



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES
EN CIENCIAS DE LA TIERRA

MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y
PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO



CALIDAD DEL AGUA Y PROCESOS HIDROGEOQUÍMICOS EN LA REGIÓN DEL
MUNICIPIO DE ZINAPÉCUARO, MICHOACÁN, MÉXICO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA

LUIS ENRIQUE JUÁREZ MARTÍNEZ

ASESOR

DR. JORGE ALEJANDRO ÁVILA OLIVERA

CO-ASESOR:

DR. PEDRO CORONA CHÁVEZ

MORELIA, MICHOACÁN. MARZO, 2026



*Para mis padres, mis primeros maestros
y mi guía constante.*

Agradecimientos

Al CONAHCYT (ahora SECIHTI) por otorgarme el apoyo económico para poder realizar mis estudios de posgrado.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, y de manera especial al Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, al cuerpo académico y administrativo, por brindarme el respaldo académico y proporcionarme los recursos intelectuales y técnicos que han sido fundamentales en mi desarrollo profesional y en la realización de esta investigación.

Al Proyecto CONAHCYT-PRONACES: “Enfermedad Renal Crónica en la Región Oriente de Michoacán y su relación con las condiciones naturales, impacto ambiental y psicosocial”, número 0322739 por el apoyo económico para poder realizar las salidas de campo.

A mi amada familia, el tesoro más grande que la vida me ha regalado. A mi padre, Salomón, y a mi madre, Rosa María, mis pilares y mi ejemplo a seguir; gracias por guiarme siempre con sabiduría por el camino del bien, por su amor incondicional y por esas palabras de aliento que fueron mi motor. A mis hermanos, Rosa Nelly, Kandy Alejandra y Oliver, quienes, con su alegría, sus buenas vibras y su fe inquebrantable en mí, me dieron el impulso necesario para culminar este gran proyecto de vida. Este triunfo no es solo mío, es de todos nosotros.

Expreso mi más profunda gratitud al Dr. Pedro Corona Chávez, quien más allá de ser un asesor excepcional, se convirtió en un mentor y amigo invaluable. Le agradezco por su compromiso inquebrantable y por haber guiado este proceso con un rigor y una paciencia admirables, virtudes que fueron el motor de este trabajo. Gracias por compartir conmigo su vasta visión de las ciencias de la tierra; bajo su tutela académica, logré la compleja pero fascinante tarea de integrar la perspectiva geológica a mi formación como ingeniero químico. Su amistad y su guía transformaron mi enfoque científico, permitiéndome abordar esta investigación desde una óptica multidisciplinaria y humana que llevaré conmigo en toda mi vida profesional

Al Dr. Yann René Ramos Arroyo, por su invaluable guía y por compartir generosamente su vasto conocimiento en el campo de la hidrogeoquímica. Le agradezco sinceramente la minuciosidad y el rigor científico de sus revisiones, las cuales fueron fundamentales para elevar la calidad de esta investigación. Su capacidad para detectar el detalle más sutil y su compromiso con la excelencia no solo pulieron este trabajo, sino que fortalecieron mi rigor analítico como profesional

A la Dra. Mercedes Gabriela Téllez Arias no solo por el honor de su amistad, sino por su papel determinante en mi carrera. Fue ella quien me orientó y presentó con el Dr. Pedro y me alentó a desafiar mis límites a través de este posgrado. Gracias por ser la catalizadora de este logro.

Expreso mi más sincero reconocimiento a los integrantes de mi mesa sinodal: la Dra. Ruth Alfaro Cuevas Villanueva, la Dra. Isabel Israde Alcántara, la Dra. María Lourdes González

Arqueros y el Dr. Jorge Alejandro Ávila Olivera. Agradezco profundamente el tiempo y la dedicación invertidos en la revisión de este trabajo; su agudo criterio y sus valiosas observaciones fueron fundamentales para fortalecer el rigor científico y la claridad de esta investigación.

A la Dra. María del Sol Hernández Bernal, le expreso mi más sincero y profundo agradecimiento por su invaluable guía, profundo conocimiento, paciencia y excelente disposición para enseñarme a abordar e interpretar el complejo tema de la isotopía. Asimismo, agradezco enormemente el tiempo y la dedicación invertidos en la minuciosa revisión de este documento; sus acertadas observaciones y críticas constructivas enriquecieron significativamente la calidad y el rigor de este trabajo.

A los Laboratorio de ICP-MS del Instituto de Geofísica de la UNAM, al Laboratorio Universitario de Geoquímica Isotópica (LUIGIS) de la UNAM y al Laboratorio Nacional De Geoquímica y Mineralogía del Instituto de Geología de la UNAM; por el análisis de las muestras del agua de la investigación.

A Daniela Jurado, mi 'beffa', por transformar este proceso en una etapa mucho más amena gracias a su amistad incondicional. Mi gratitud se extiende también a tu valioso aporte profesional: tu generosidad al compartir tus conocimientos e insumos cartográficos fue clave para la realización de los mapas que integran esta investigación.

A Beto, por su amistad, además su invaluable apoyo y disposición para compartir sus conocimientos geológicos. Gracias por sus explicaciones, que fueron fundamentales tanto en mi formación académica como en el desarrollo de esta investigación, el aprendizaje y manejo de los SIG.

A mis amigos y colegas del INICIT, quienes hicieron del aula y pasillos un segundo hogar. De manera muy especial a mi generación: Rodrigo, Óscar, Berenice, Tzeltzin, Alejandra, Estrella, Grecia y Sergio; gracias por caminar a mi lado desde el primer día, por la fraternidad incondicional y por las experiencias inolvidables. Asimismo, mi gratitud para Laura, Diego, Jamila, Sebastián, Bernardo, Antonio, Saida, Aura, Luisa, Alejandro, Isabel, Diana y Dulce, por la complicidad, las risas y los buenos momentos que dieron el balance perfecto a este proceso. Gracias por hacer este camino mucho más ligero y humano.

A KMNA, cuya presencia fue determinante para culminar este proceso, gracias por tu cariño y por ese aliento constante que nunca me dejó caer. En el año más difícil y desafiante de mi formación, fuiste tú quien supo escucharme y acompañarme, tu compañía fue lo que lo hizo transitable, transformando el cansancio en motivación.

A mi tía Lulú cuya motivación y palabras de aliento fueron un soporte fundamental durante todo este proceso. Gracias por creer en mí de principio a fin.

Resumen

El estudio de los procesos hidrogeoquímicos es fundamental para comprender la evolución de la composición química del agua y los procesos naturales o antropogénicos y, por lo tanto, es una herramienta muy útil para garantizar la seguridad hídrica en las fuentes de abastecimiento de la población.

Investigaciones previas en la Región Oriente de Michoacán (ROM) han documentado una problemática de salud pública crítica debido a una alta incidencia de Enfermedad Renal Crónica de Etiología no Determinada (ERCEND), que afecta incluso a la población infantil. La Región del Municipio de Zinapécuaro (RMZ), dentro de la ROM, presenta un perfil epidemiológico atípico que sugiere un origen ambiental relacionado con la ingesta de agua o inhalación de aire.

La geología local y la presencia del Campo Geotérmico Los Azufres (CGLA) representa una principal línea de investigación de impacto ambiental, ya que podrían causar la dispersión de elementos potencialmente tóxicos (EPT) como el arsénico y boro, por lo que es necesario caracterizar las fuentes de abastecimiento para distinguir entre procesos naturales e impactos antropogénicos.

Este estudio tiene como objetivo determinar la calidad del agua de las fuentes de abastecimiento en la RMZ y analizar las variaciones espacio-temporales de su composición química vinculadas a procesos hidrogeoquímicos. Se colectaron muestras de 18 sitios de abastecimiento de agua de manantiales y pozos, indicados por la población, durante las temporadas de precipitación y estiaje en los años 2023-2024 para un total de 30 muestras. Las muestras fueron analizadas por medio de técnicas analíticas de cromatografía iónica (IC), ICP-MS en laboratorios certificados, así como también se seleccionaron 10 muestras para análisis isotópico de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ determinados por espectrometría de masas (TIMS).

El 47% de las muestras presentan facies bicarbonatadas sódicas, el 33% cloruradas/sulfatadas sódicas y el 20% bicarbonatadas cálcicas/magnésicas. A pesar de que el cálculo del ICA califica la mayoría de las fuentes como "excelentes" o "buenas", en relación con las concentraciones de los EPT, se observa que el 50% de las muestras exceden los límites internacionales para boro y 10 muestras superan la norma para arsénico, indicando una toxicidad de las fuentes de abastecimiento que debe ser considerada para cualquier recomendación de uso y consumo humano.

Con base en el análisis geoquímico de elementos traza y del modelado isotópico de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ se identificó que el proceso hidrogeoquímico de la interacción agua-roca es menor al 5%, mientras que el procesos de mezcla binaria con fluidos hidrotermales y geotérmicos es dependiente de la cercanía con el CGLA.

Se concluye que ante la alta vulnerabilidad epidemiológica de la región y con base en los resultados hidrogeoquímicos de la RMZ, se recomienda realizar el monitoreo permanente y la implementación de procesos de potabilización en los sitios con mayor toxicidad.

Palabras clave: hidrogeoquímica, calidad del agua, interacción agua-roca, isotopía, mezcla de aguas, Campo Geotérmico Los Azufres

Abstract

The study of hydrogeochemical processes is essential to understanding the evolution of natural water chemical composition and anthropogenic handling. This become a powerful tool for ensuring water security in public supply sources.

Previous research in the Eastern Region of Michoacán (ROM) has documented a critical public health issue due to a high incidence of Chronic Kidney Disease of Unknown Etiology (ERCEND), which affects even young population. The Zinapecuaro Municipality Region (RMZ) is located within the ROM and show this atypical epidemiological profile suggesting an environmental origin related to water intake or air inhalation.

The acid volcanic record as well as the installation and operation of the Los Azufres Geothermal Field (CGLA) since 1982 are main research line that could cause environmental impact related to the spreading of potentially toxic elements (EPT). It is critical to distinguish the differences between the possible sources between natural hydrothermal and anthropogenic processes. This study aims to determine the quality of water for human consumption in the RMZ and to analyze the spatio-temporal variations of their chemical composition linked to hydrogeochemical processes.

18 water supply sites were sampled in rainfall and low water of 2023-2024, including springs and wells which are directly identified by the population. The samples were analyzed using ion chromatography (IC) and ICP-MS in certified laboratories. Additionally, 10 samples were selected for $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotopic analysis determined by mass spectrometry (TIMS).

Hydrochemical facies reveal that 47% of the samples are sodium-bicarbonate type, 33% are sodium-chloride/sulfate type, and 20% are calcium/magnesium-bicarbonate type. Although the Water Quality Index (ICA) calculation advises most sources as "excellent" or "good," however EPT concentrations shows that >50% of the samples exceed international limits for boron and arsenic elements, suggesting a relatively high toxicity in the supply water sources must be considered.

Based on trace elements and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotopic modeling we agree that water-rock interaction as a hydrogeochemical process of water-rock interaction does not reach to be less than 5%, whereas the binary mixing water process between hydrothermal, geothermal fluids and rain water depends on proximity to the CGLA suggesting a close relationship with the processes of contamination of water for human consumption. Permanent monitoring and the implementation of water purification processes in The RMZ are encouraged.

Key words: hydrochemistry process, Water Quality Index, water rock interaction, mixing water, Los Azufres Geothermal Field.

Índice

Dedicatoria.....	vii
Agradecimientos.....	viii
Resumen	x
Abstract.....	xi
Índice	1
Índice de figuras	5
Índice de tablas	7
Capítulo I. Introducción.....	9
Capítulo II. Marco teórico 1: Procesos hidrogeoquímicos.....	12
2.1. Estructura y propiedades del agua.....	12
2.2. Propiedades fisicoquímicas del agua.....	13
2.3. Concepto de hidrogeoquímica.....	16
2.4. Equilibrio y procesos fisicoquímicos del agua.....	16
2.5. Procesos biológicos relacionados con microorganismos.....	20
2.6. Principales procesos hidrogeoquímicos en el agua	21
2.6.1. Interacción agua-roca	22
2.6.2. Procesos de mezcla agua	23
2.7. Componentes ideales (<i>end members</i>) y análisis de procesos de mezcla	25
2.7.1. Mezcla conservativa	26
2.7.2. Mezcla no conservativa	26
Capítulo III. Marco teórico 2: Calidad y normatividad de agua	27
3.1. Concepto de calidad del agua	27
3.2. Criterios de calidad del agua	28
3.3. Índice de calidad del agua (ICA).....	29

3.3.1.	Concepto y objetivo del ICA	29
3.3.2.	Metodología general del ICA	29
3.3.3.	Índice de calidad del agua (ICA) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)	30
3.4.	Tipos de contaminantes del agua	32
3.4.1.	Contaminantes biológicos	32
3.4.2.	Contaminantes químicos	32
3.4.3.	Contaminantes físicos	34
3.4.4.	Contaminantes radiológicos	35
3.5.	Tipos de enfermedades relacionadas con los EPT	35
3.6.	Normatividad nacional e internacional para la calidad del agua	36
3.6.1.	Normativa oficial mexicana NOM-127-SSA1-2021	38
3.6.2.	Normativa internacional (OMS-2011 y EPA-2015)	38
Capítulo IV. Región del Municipio de Zinapécuaro (RMZ)		40
4.1.	Localización del área de estudio	40
4.1.1.	Localización y vías de acceso	40
4.1.2.	Asentamientos humanos	41
4.1.3.	Índices de pobreza y marginalidad	42
4.1.4.	Clima	43
4.1.5.	Vegetación y uso de suelo	46
4.2.	Marco Geológico de la RMZ	47
4.2.1.	Basamento relativo: La Sierra de Mil Cumbres	47
4.2.2.	Campo Volcánico Michoacán Guanajuato (CVMG)	47
4.2.3.	Campo Geotérmico Los Azufres (CGLA)	48
4.3.	Hidrología de la RMZ	50

4.3.1.	Antecedentes de estudios hidrológicos de la RMZ	52
4.3.2.	Fuentes de abastecimiento de agua de la RMZ	54
Capítulo V. Justificación y objetivos		56
5.1.	Justificación	56
5.2.	Objetivo general	57
5.3.	Objetivos específicos	57
Capítulo VI. Materiales y métodos		58
6.1.	Investigación bibliográfica y cartográfica	58
6.2.	Trabajo de campo	59
6.2.1.	Criterios y selección de sitios de muestreo.....	59
6.2.2.	Preparación de material de muestreo.....	59
6.3.	Técnicas analíticas.....	60
6.3.1.	Determinación de aniones	60
6.3.2.	Determinación de cationes.....	60
6.3.3.	Determinación de elementos traza.....	60
6.3.4.	Determinación de isótopos $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	61
6.4.	Proyección y caracterización de facies hidrogeoquímicas	61
6.5.	Calidad del agua	62
6.6.	Integración e interpretación de datos.....	62
Capítulo VII. Resultados.....		64
7.1.	Trabajo de campo	64
7.1.1.	Descripción de manantiales	65
7.1.2.	Descripción de los pozos de agua.....	73
7.1.3.	Descripción del agua de río Laguna Larga - Santa Teresa	75
7.1.4.	Parámetros fisicoquímicos de campo	77

7.2.	Caracterización hidrogeoquímica	77
7.2.1.	Comprobación del balance iónico	77
7.2.2.	Agrupación y tendencias de los manantiales de la RMZ.....	79
7.2.3.	Facies hidrogeoquímicas de la RMZ	85
7.2.4.	Distribución espacial y variaciones de los diagramas de Stiff	87
7.2.5.	Relación isotópica $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	93
7.3.	Calidad del agua de la RMZ	95
7.3.1.	Parámetros fisicoquímicos para evaluación de potabilidad del agua	96
7.3.2.	Límites permisibles de elementos potencialmente tóxicos.....	96
7.3.3.	Índice de Calidad del Agua (ICA) de la RMZ.....	104
Capítulo VIII. Discusión		108
8.1.	Distribución espacial y variaciones de los sitios de abastecimiento de agua de la RMZ	108
8.2.	Variabilidad de las facies hidrogeoquímicas de la RMZ	109
8.3.	Diagnóstico de calidad del agua	115
8.4.	Principales procesos hidrogeoquímicos de la RMZ	117
8.5.	Modelado isotópico y evidencia de mezcla de agua meteórica y geotérmica	121
Capítulo IX. Conclusiones		125
Referencias		127
Anexos.....		139
Anexo I. Definiciones de hidrología e hidrogeología.		
Anexo II. Fuentes de abastecimiento de aguas naturales.		
Anexo III. Tabla de armonización de normas en América Latina.		
Anexo IV. Caracterización hidrogeoquímica.		
Anexo V. Metodología de muestreo de agua en campo.		

Anexo VI. Cálculo balance de carga.

Anexo VII. Tabla de valores promedio y desviación estándar de los parámetros físicoquímicos y EPT.

Anexo VIII. Tabla de cálculo del ICA.

Índice de figuras

Figura 1. Imagen que muestra la polaridad de la molécula del agua y el ángulo que forma de 104.5°. Fuente: https://bachinuria.wordpress.com/2016/11/12/h2o-polar-y-electricamente-neutra/	13
Figura 2. Muestra el proceso de interacción entre el agua que fluye por fisuras o huecos de la roca. Fuente: https://www.nature.org/es-us/que-hacemos/nuestra-vision/perspectivas/aguas-subterraneas-nuestro-recurso-mas-valioso/	23
Figura 3. Imagen que muestra la calidad del agua potable que se tiene acceso en México. Fuente: https://ecofiltro.mx/blogs/news/indicadores-de-calidad-del-agua-en-mexico?srsltid=AfmBOooWDOm0NIEaN5D_zefpbKxZ3YDq8Hcp_S-Qi9AmFOMkKIBI4HJ	28
Figura 4. Mapa de localización geográfica de la RMZ, muestra las principales localidades y vías de acceso. Fuente: Elaboración propia.....	41
Figura 5. Mapa de climas que existen en la RMZ de acuerdo con los polígonos de CONABIO, 1998. Fuente: modificado de García (CONABIO), (1998).....	44
Figura 6. Mapa Geológico de la Región del Municipio de Zinapécuaro. Fuente: modificado de Jurado-Calderón (2025).	48
Figura 7. Mapa Hidrológico de la Región del Municipio de Zinapécuaro. Fuente: Propia	51
Figura 8. Mapa de distribución de muestras de los ríos, manantiales y pozos de la RMZ. Fuente: Elaboración propia.....	65
Figura 9. Fotos de los manantiales muestreados de la RMZ. Inciso a) Agua Fría, b) Canoitas, c) Los Veneros, d) Tico, e) Cañada Los Lobos y f) Jeráhuaro. Fuente: Propia	69
Figura 10. Pozos muestreados de la RMZ. a) Urano, b) Queréndaro y c) Tinajas. Fuente: Fotografías propias	74

Figura 11. Foto del Arroyo Laguna Larga donde se ubica el manantial de Cañada Los Lobos II y donde se colectó la muestra de agua de río. Fuente: Fotografía propia.....	76
Figura 12. Diagrama de barras de Cationes de las muestras analizadas. Fuente: Propia.	82
Figura 13. Diagrama de barras de Aniones de las muestras analizadas. Fuente: Propia.	82
Figura 14. Diagrama de Conductividad Eléctrica (EC) vs concentración de sodio (Na^+) en mg/L.	84
Figura 15. Diagrama Piper de las muestras de temporada de precipitación y estiaje, muestra las facies hidrogeoquímicas.....	86
Figura 16. Diagramas de Stiff de los manantiales intermedios, en la parte superior tienen la clave de la muestra a la cual pertenecen. Fuente: Propia.	89
Figura 17. Diagramas de Stiff de los manantiales altos, en la parte superior tienen la clave de la muestra a la cual pertenecen. Fuente: Propia.....	90
Figura 18. Diagramas de Stiff de los manantiales bajos, en la parte superior tienen la clave de la muestra a la cual pertenecen. Fuente: Propia.....	91
Figura 19. Diagramas de Stiff del Arroyo L. Larga–Sta. Teresa, temporada de precipitación (o23) y temporada de estiaje (a24). Fuente: Propia.....	91
Figura 20. Diagramas de Stiff de pozos, en la parte superior tienen la clave de la muestra a la cual pertenecen. Fuente: Propia.....	92
Figura 21. Mapa que muestra los patrones de los diagramas de Stiff de la RMZ. Fuente Propia.....	94
Figura 22. Diagrama de concentración de $1/\text{Sr}$ en $[\text{mg/L}]^{-1}$ vs relación isotópica $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. Fuente Propia.....	95
Figura 23. Diagrama de barras del As (mg/L) contra el Límite Máximo Permissible de las Normas NOM-127, OMS 2011 y US EPA 2015. En color amarillos las muestras que sobrepasan el LMP de las normas y en color azul las muestras que están por debajo del LMP.	99
Figura 24. Diagrama de barras del B (mg/L) contra el Límite Máximo Permissible (LMP) de las Normas OMS 2011 y US EPA 2015. En color amarillos las muestras que sobrepasan el LMP de las normas y en color azul las muestras que están por debajo del LMP.	100

Figura 25. Diagrama de barras del Al (mg/L) contra el Límite Máximo Permisible de las Normas NOM-127 y OMS 2011. En color amarillos las muestras que sobrepasan el LMP de las normas y en color azul las muestras que están por debajo del LMP.	101
Figura 26. Diagrama de barras del Fe (mg/L) contra el Límite Máximo Permisible de las Normas NOM-127 y OMS 2011. En color amarillos las muestras que sobrepasan el LMP de las normas y en color azul las muestras que están por debajo del LMP.	102
Figura 27. Diagrama de barras del Si (mg/L). Fuente: propia.	103
Figura 28. Mapa de afectación de EPT (As, B, Fe y Al) en la RMZ, muestra cuales son los puntos que están por arriba del valor de las normas. Fuente: Propia.	106
Figura 29. Mapa de distribución de las muestras de este trabajo y de referencias en la RMZ. Fuente: Propia.	110
Figura 30. Diagramas de Piper de las muestras de la RMZ (izquierda) en comparación con las muestras analizadas por Birkle & Merkel, (2000), de ríos y pozos geotérmicos (derecha). Fuente Propia.	112
Figura 31. Diagramas de Stiff de la bibliografía y propia. Como muestra meteórica Camp. Agua Fría (González-Partida, 2000), como muestra de Pozo de abastecimiento Fco. I. Madero (FMo23), como muestra Termal Zimirao (González-Partida, 2000) y como muestra Geotérmica Pozo AZ_2 (Birkle & Merkel, 2000) Fuente: Propia.	114
Figura 32. Diagrama de Gibbs que muestras los mecanismos de control de las muestras. Fuente: Propia.	120
Figura 33. Diagrama de Giggenbach que muestra la madurez del agua. Fuente: Propia. ..	121
Figura 34. Diagrama de 1/Ca (ppm) vs relación isotópica de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ y su relación de mezcla con las rocas de la región: riolita y andesita. Fuente: Propia.	122
Figura 35. Diagrama de 1/Ca (ppm) vs relación isotópica de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ y su relación de mezcla con pozos geotérmicos, balnearios termales y manifestaciones termales. Fuente: Propia.	124

Índice de tablas

Tabla 1. Límites máximos permisibles de la Norma Oficial Mexicana para agua potable (NOM-127-SSA1-2021).	38
--	----

Tabla 2. Límites permisibles de la Organización Mundial de la Salud y la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (OMS-2011 y EPA-2015).....	39
Tabla 3. Parámetros Fisicoquímicos obtenidos en campo	78
Tabla 4. Resultados de los análisis de aniones y cationes obtenidos por la técnica de cromatografía iónica (CI) de las muestras colectadas en los sitios de la RMZ. Se incluye el cálculo de miliequivalente sobre litro (meq/L) para cada componente. Las claves se asignaron con base al sitio y a la temporalidad del muestreo.	80
Tabla 5. Balance de Carga Iónico (BCI) de las muestras colectadas en los sitios de la RMZ.	81
Tabla 6. Síntesis de las facies hidrogeoquímicas que presentan las muestras.	88
Tabla 7. Valores promedio de los parámetros fisicoquímicos y concentraciones de elementos potencialmente tóxicos obtenidos de la tabla del Anexo VII donde se presentan todos los valores y concentraciones obtenidas, así como el cálculo del promedio (Avg) y desviación estándar (stdDev). En este caso se colocan solo los valores promedio con la finalidad de compararlos con los normados (en la base) a nivel nacional e internacional. Los valores cerca del límite permisible en naranja, en rojo cuando coinciden o superan los límites permisibles y en verde los valores por debajo de los límites permisibles. Los guiones indican que los valores están por debajo del valor de detección y los valores que se muestran como 0.000 tienen un valor redondeado por el umbral de visualización que es a partir de la cuarta decimal.	97
Tabla 8. Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT), las normas que rebasan, el tipo de cuerpo de agua al que pertenece, localidad afectada, ríos afectados. Fuente: Propia.	105
Tabla 9. Valores obtenidos del ICA y tabla de tipo de agua, tomada de Varol et al. (2021).	106
Tabla 10. Correlación de Pearson con los iones mayoritarios y los elementos potencialmente tóxicos.....	118

Capítulo I. Introducción



La hidrogeoquímica es la disciplina científica interdisciplinaria que estudia la composición química de las aguas naturales y los procesos geológicos, químicos y físicos que gobiernan dicha composición a lo largo del tiempo y el espacio (Hem, 1985). En la actualidad, el conocimiento en esta disciplina ha cobrado una relevancia crítica debido a la creciente demanda de recursos hídricos y la necesidad de garantizar su seguridad para el consumo humano y los ecosistemas (UNESCO, 2021). La hidrogeoquímica integra principios de termodinámica y cinética para explicar la evolución del agua desde su precipitación hasta su incorporación en los sistemas de flujo. Según Langmuir (1997) esta ciencia busca explicar por qué las aguas tienen una composición específica y cómo ésta cambia, dividiéndose fundamentalmente en el estudio de fases disueltas, interacciones con la matriz sólida y el transporte de especies químicas (Appelo & Postma, 2005).

La hidrogeoquímica permite identificar variaciones entre aguas de origen meteórico que se consideran prístinas, las cuales a partir del proceso de infiltración proceden a cambiar su composición durante su flujo subterráneo, por procesos antropogénicos, de contaminación e interacción agua-roca (disolución, precipitación, meteorización e intercambio iónico) (Clark & Fritz, 1997). La hidrogeoquímica se centra en procesos complejos de aguas subterráneas como la interacción agua-roca y los procesos de mezcla de fluidos, ya sea líquido, vapor o su mezcla. Las herramientas estadísticas y de proyección, como diagramas hidrogeoquímicos, así como cálculos termodinámicos y diagramas de equilibrio, permiten un manejo de los elementos químicos como componentes trazadores de procesos de interacción agua-roca o de procesos de mezcla de fluidos. Resulta fundamental estudiar las relaciones iónicas,

elementos traza en conjunto con trazadores isotópicos como $\delta^{18}\text{O}$, δD y la relación isotópica $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, que hacen posible identificar las firmas geoquímicas que resultan de la disolución mineral y los tiempos de residencia del agua en el subsuelo (Capo *et al.*, 1998; Bentley, 2006).

Los estudios de hidrogeoquímica son el pilar sobre el cual se sustenta la evaluación de la calidad del agua, entendida como el conjunto de características que determinan su idoneidad para un uso específico (Chapman, 1996). La aptitud del recurso hídrico se determina mediante la comparación rigurosa con criterios establecidos, tales como los Límites Máximos Permisibles estipulados en la Normativa Mexicana NOM-127-SSA1-2021 (Secretaría de Salud, 2021), así como estándares internacionales de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2011) y la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés 2015). Para facilitar la interpretación de estos datos complejos ante tomadores de decisiones y la sociedad, se ha implantado de manera convencional el uso del Índice de Calidad de Agua (ICA) (Sargaonkar & Deshpande, 2003). Esta metodología de agregación ponderada permite transformar grandes volúmenes de datos fisicoquímicos en un valor único que refleja el estado de salud de un cuerpo de agua, clasificándolo desde “excelente” hasta “fuertemente contaminado” (CONAGUA, 2020).

Diversos reportes y antecedentes científicos han señalado a la región oriente de Michoacán como una región con un importante problema de salud pública (Corona-Chávez *et al.*, 2022; Robinson-Fuentes *et al.*, 2023). La problemática se debe a una alta incidencia de Enfermedad Renal Crónica de Etiología no Determinada (ERCEND), que afecta incluso a población infantil.

La geología local y particularmente la operación de la planta del Campo Geotérmico Los Azufres favorecen una potencial presencia natural de elementos potencialmente tóxicos en el medio ambiente de aire y agua, tales como el arsénico y otros metales pesados. Por ello, resulta imperativo caracterizar las fuentes de abastecimiento de agua de la región para discernir entre procesos naturales y procesos antropogénicos (Panduro-Rivera, 2015; Birkle & Merkel, 2000).

En este estudio se presenta la caracterización hidrogeoquímica de muestras de agua colectadas en fuentes de consumo directo de la población de la región del Municipio de Zinapécuaro. Con base en los datos obtenidos se lleva a cabo una evaluación integral de la

calidad del agua, así como la discusión de los procesos hidrogeoquímicos de la subcuenca, con la finalidad de distinguir las relaciones de toxicidad de origen natural con respecto a las de origen antropogénico o el impacto ambiental generado por la mezcla de agua meteórica y fluidos de origen geotérmico procedentes de la planta geotérmica.

Cabe mencionar que esta tesis forma parte de un proyecto de investigación multidisciplinario más amplio, el cual aborda la problemática desde tres áreas de conocimiento: salud pública, ambiental y psico-social (Robinson-Fuentes *et al.*, 2023).

Capítulo II. Marco teórico 1:

Procesos hidrogeoquímicos



En este capítulo se aborda el tema de los procesos hidrogeoquímicos con la finalidad de establecer algunas bases teóricas del agua como agente geoquímico, resaltando sus propiedades fisicoquímicas, para contextualizar los procesos hidrogeoquímicos del agua subterránea, como uno de los principales objetivos de este estudio.

El agua es una molécula inorgánica formada por dos átomos de hidrógeno unidos covalentemente a un átomo de oxígeno (H_2O), con una geometría angular de aproximadamente 104.5° y una distribución asimétrica de carga que le confiere un marcado carácter dipolar (Ball, 2008). Esta aparente simplicidad estructural contrasta notablemente con la complejidad de sus propiedades físicas y químicas, las cuales han sido fundamentales para el desarrollo y mantenimiento de la vida en la Tierra (Chaplin, 2006). La configuración electrónica del oxígeno y la formación de enlaces de hidrógeno entre moléculas de agua, generan un comportamiento único que se manifiesta en diversas propiedades fisicoquímicas extraordinarias.

2.1. Estructura y propiedades del agua

El agua cubre cerca del 71 % de la superficie terrestre y constituye entre el 60 y el 90 % de la masa de los organismos vivos, y la principal cualidad de esta sustancia es que es capaz de diluir un mayor número de sustancias que cualquier otro solvente. La aparente sencillez de su composición (H_2O) contrasta con un conjunto de propiedades fisicoquímicas

extraordinarias que le permiten interactuar en los ciclos biogeoquímicos, la regulación climática, etc. (Georgios *et al.*, 2022).

La clave de sus propiedades no reside solo en su composición, sino en su estructura angular y su polaridad (Figura 1). El átomo de oxígeno es altamente electronegativo, lo que significa que atrae con más fuerza a los electrones que comparte con los átomos de hidrógeno. Esto crea una distribución desigual de la carga eléctrica: una carga parcial negativa (δ^-) cerca del oxígeno y cargas parciales positivas (δ^+) cerca de los hidrógenos (Franks, 2000).

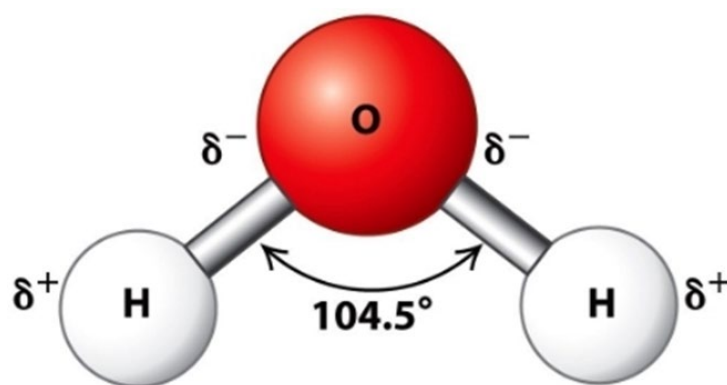


Figura 1. Imagen que muestra la polaridad de la molécula del agua y el ángulo que forma de 104.5° . Fuente: <https://bachinuria.wordpress.com/2016/11/12/h2o-polar-y-electricamente-neutra/>

Así mismo, sus propiedades fisicoquímicas derivan de la polaridad inherente y la formación de puentes de hidrógeno. A nivel intramolecular, el agua se mantiene unida por enlaces covalentes polares con compartición desigual de electrones. No obstante, a nivel intermolecular, la fuerza dominante es el puente de hidrógeno. Este puente consiste en una atracción electrostática específica entre la carga parcial positiva (δ^+) de un átomo de hidrógeno y la carga parcial negativa (δ^-) del oxígeno de una molécula vecina (Eisenberg & Kauzmann, 2005).

2.2. Propiedades fisicoquímicas del agua

Las propiedades fisicoquímicas del agua se refieren al conjunto de características medibles y observables que resultan de su estructura molecular y de las interacciones intermoleculares que establece, determinando su comportamiento tanto en estado puro como en presencia de solutos (Stillinger, 1980). Estas propiedades incluyen; i) la acción disolvente, ii) la cohesión y adhesión molecular, iii) el calor específico, iv) la constante dieléctrica, v) su capacidad como solvente geológico universal, así como vi) los fenómenos de ionización y

conductividad. A continuación, se resumen brevemente cada una de estas propiedades fundamentales.

a) Acción disolvente

La acción disolvente del agua se refiere a su capacidad excepcional para disolver una amplia variedad de sustancias, tanto iónicas como polares, formando soluciones homogéneas estables (Marcus, 2009). Esta propiedad se fundamenta en el carácter dipolar de la molécula de agua y en su capacidad para formar enlaces de hidrógeno con solutos. Cuando un compuesto iónico (*eg*, cloruro de sodio) se introduce en agua, las moléculas de agua rodean a los iones individuales mediante un proceso denominado hidratación o solvatación (Ohtaki & Radnai, 1993). Los extremos parcialmente negativos del agua (átomos de oxígeno) se orientan hacia los cationes, mientras que los extremos parcialmente positivos (átomos de hidrógeno) se orientan hacia los aniones, estabilizando los iones en solución y reduciendo significativamente las fuerzas electrostáticas entre ellos.

b) Cohesión entre sus moléculas

La cohesión molecular se define como la atracción intermolecular entre moléculas idénticas, en este caso, entre moléculas de agua (Israelachvili, 2011). Esta propiedad es consecuencia directa de los enlaces de hidrógeno que cada molécula de agua puede establecer como puente con las moléculas vecinas, formando hasta cuatro enlaces de hidrógeno: dos a través de sus átomos de hidrógeno (como donadores) y dos a través de los pares de electrones no compartidos del oxígeno (como receptores) (Wernet *et al.*, 2004).

La cohesión molecular es responsable de la elevada tensión superficial del agua, aproximadamente 72 mN/m a 25 °C, una de las más altas entre los líquidos comunes (Vargaftik *et al.*, 1983). Esta tensión superficial permite fenómenos como la formación de gotas esféricas, la flotación de objetos pequeños sobre la superficie del agua y, el desplazamiento de algunos insectos sobre ella.

c) Adhesión molecular

La adhesión molecular representa la atracción entre moléculas de agua y moléculas de otras sustancias, particularmente aquellas con superficies polares o cargadas (Butt *et al.*, 2003). Esta propiedad complementa la cohesión y resulta esencial para diversos fenómenos físicos

y biológicos. La adhesión del agua a superficies hidrofílicas como el vidrio, la celulosa y las proteínas se debe a la formación de enlaces de hidrógeno entre las moléculas de agua y los grupos funcionales polares de estas superficies.

d) Calor específico

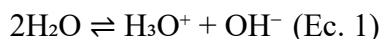
El calor específico del agua se define como la cantidad de energía térmica necesaria para elevar la temperatura de un gramo de agua en un grado Celsius (o Kelvin) (Angell, 2008). El agua posee uno de los calores específicos más elevados entre las sustancias comunes, con un valor aproximado de 4.18 J/(g °C) a 25°C. Este valor excepcionalmente alto se atribuye a la red tridimensional de enlaces de hidrógeno que debe ser parcialmente rota para aumentar la energía cinética molecular y, por ende, la temperatura (Debenedetti & Stanley, 2003).

e) Constante dieléctrica

La constante dieléctrica, también conocida como permitividad relativa, es una medida de la capacidad de una sustancia para reducir la fuerza de atracción electrostática entre cargas opuestas (Hasted *et al.*, 1948). El agua posee una constante dieléctrica excepcionalmente alta, aproximadamente 78.5 a 25 °C, comparada con valores cercanos a 2-5 para la mayoría de los solventes orgánicos. Este valor elevado refleja la capacidad de las moléculas de agua para orientarse en presencia de un campo eléctrico, debido a su momento dipolar permanente de 1.85 Debye (Eisenberg & Kauzmann, 2005).

f) Ionización

La ionización del agua, también conocida como autoionización o autoprotólisis, es el proceso mediante el cual las moléculas de agua se disocian espontáneamente en iones hidronio (H₃O⁺) e hidróxido (OH⁻) (Eigen & De Maeyer, 1958). Esta reacción, aunque ocurre en una extensión muy limitada, es fundamental para comprender el comportamiento ácido-base del agua y de las soluciones acuosas:



A 25°C, la constante de producto iónico del agua (K_w) tiene un valor de aproximadamente $1.0 \times 10^{-14} \text{ mol}^2/\text{L}^2$, lo que indica que en agua pura las concentraciones de H₃O⁺ y OH⁻ son cada una de $1.0 \times 10^{-7} \text{ mol/L}$, estableciendo el pH neutro en 7.0 (Bell, 1973). Este equilibrio

es extremadamente sensible a la temperatura, aumentando con ella debido al carácter endotérmico del proceso de ionización.

g) Conductividad

La conductividad eléctrica del agua se refiere a su capacidad para conducir corriente eléctrica, propiedad que depende de la presencia de iones móviles en solución (Atkins & Paula, 2010). El agua pura tiene una conductividad extremadamente baja, aproximadamente $0.055 \mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C , debido únicamente a los iones H_3O^+ y OH^- generados por su auto-ionización. Sin embargo, cuando el agua contiene solutos iónicos disueltos, como elementos metálicos, su conductividad aumenta dramáticamente de manera proporcional a la concentración de iones presentes (Gray, 2004).

2.3. Concepto de hidrogeoquímica

La hidrogeoquímica puede definirse como la ciencia que estudia la composición química de las aguas naturales en la Tierra y los procesos que controlan su composición, incluyendo las reacciones químicas, los intercambios de materia y energía, y las transformaciones que ocurren durante la interacción agua-roca-gas-biota (Hem, 1985). La hidrogeoquímica representa una disciplina científica fundamental para comprender la compleja interacción entre el agua como sistema hidrósfera con otros sistemas termodinámicos terrestres como la biósfera, la atmósfera y la litósfera. La interacción ocurre en los procesos de transformación de los materiales geológicos con los que entra en contacto durante el proceso hidrológico superficial y subterráneo. Esta ciencia interdisciplinaria combina principios de hidrología, geología, química y física para explicar la composición química de las aguas naturales y los procesos que controlan dicha composición (Appelo & Postma, 2005).

2.4. Equilibrio y procesos fisicoquímicos del agua

Según Langmuir (1997) la hidrogeoquímica busca explicar la composición química de las aguas naturales y determinar cuáles son los factores que controlan los cambios.

Los fundamentos teóricos de la hidrogeoquímica, por lo tanto, se sustentan en principios de equilibrio termodinámico, cinética química y balance de masas. La comprensión de estos principios es esencial para interpretar correctamente los datos hidrogeoquímicos y modelar el comportamiento de los sistemas acuáticos naturales (Langmuir, 1997).

La base fundamental de la hidrogeoquímica cuantitativa reside en la ley de acción de masas, que establece que para una reacción química en equilibrio:



Donde **A** y **B** son las sustancias de la reacción; y, **a** y **b** son sus coeficientes estequiométricos.

A esta ecuación se agrega una constante de equilibrio (**K**) la cual se expresa como:

$$K_{eq} = \{B\}^b / \{A\}^a \quad (\text{Ec. 3})$$

donde los términos entre llaves representan los coeficientes de las actividades de las especies químicas (Stumm y Morgan, 1996).

Así mismo, es importante resaltar que los cambios de composición química o de fase termodinámica, se refieren aquí como procesos hidrogeoquímicos, los cuales incluyen: disolución y precipitación mineral, intercambio iónico, adsorción y desorción, reacciones redox, y procesos biológicos mediados por microorganismos.

a) Disolución

La solubilidad de minerales se describe mediante el producto de solubilidad (**K_{sp}**), que expresa el estado de saturación de un agua como solvente respecto a un mineral como soluto relativo, se evalúa mediante el índice de saturación (**IS**):

$$IS = \log (IAP/K_{sp}) \quad (\text{Ec. 4})$$

donde **IAP** es el producto de actividad iónica (Langmuir, 1997). Los valores de **IS** > 0 indican sobresaturación (tendencia a precipitación), **IS** = 0 equilibrio, e **IS** < 0 subsaturación (tendencia a disolución). Esta relación es fundamental para predecir la evolución química del agua durante su circulación (Nordstrom & Munoz, 1994).

b) Precipitación mineral

La precipitación mineral representa el proceso inverso a la disolución, donde especies iónicas disueltas en solución se combinan para formar una fase sólida que se separa de la solución cuando se excede el producto de solubilidad del compuesto (Stumm & Morgan, 1996). Este fenómeno puede expresarse mediante el producto de solubilidad (**K_{ps}**) por una constante de

equilibrio que relaciona las concentraciones de los iones en solución saturada con el sólido precipitado.

La precipitación de minerales en sistemas acuáticos es controlada por múltiples factores incluyendo: pH, temperatura, fuerza iónica, presencia de iones comunes y sustancias orgánicas (Langmuir, 1997).

c) Intercambio iónico

El intercambio iónico es un proceso reversible mediante el cual iones presentes en una fase sólida (intercambiador) son reemplazados por iones de igual carga provenientes de una solución circundante (Appelo & Postma, 2005). Este fenómeno ocurre principalmente en minerales arcillosos, materia orgánica y resinas sintéticas que poseen sitios de intercambio con carga eléctrica permanente o dependiente del pH.

En sistemas naturales, el intercambio catiónico predomina sobre el aniónico debido a la abundancia de minerales con carga superficial negativa. Los cationes típicamente intercambiables incluyen a elementos como el calcio, magnesio, sodio, potasio y amonio, cuya afinidad relativa por los sitios de intercambio generalmente sigue la serie liotrópica (Sposito, 2008).

d) Adsorción y desorción

La adsorción se define como la acumulación de sustancias (adsorbato) en la interfase entre dos fases, típicamente entre una fase sólida (adsorbente) y una solución acuosa (Davis & Kent, 1990). Este proceso se relaciona con la energía de superficie y debe distinguirse del intercambio iónico, aunque frecuentemente ocurren simultáneamente. La adsorción puede clasificarse en física (fisisorción), mediada por fuerzas de Van Der Waals, y química (quimisorción), que involucra enlaces químicos específicos entre el adsorbato y la superficie (Stumm, 1992).

La desorción representa el proceso inverso, donde especies previamente adsorbidas se liberan nuevamente a la solución. El equilibrio entre adsorción y desorción es particularmente útil en procesos de saneamiento de agua, ya que determina la distribución de contaminantes, nutrientes y metales traza entre las fases sólida y acuosa. La adsorción de metales pesados,

pesticidas y compuestos orgánicos en sedimentos y partículas en suspensión, constituye un mecanismo fundamental de atenuación natural de contaminantes (Dzombak & Morel, 1990).

Los modelos de adsorción más utilizados incluyen las isothermas de Langmuir y Freundlich para describir el equilibrio, y el modelo de complejación superficial que considera la naturaleza química de las interacciones entre solutos y superficies minerales (Stumm, 1992).

e) Reacciones redox

Los procesos de oxidación-reducción son reacciones químicas que involucran transferencia de electrones entre especies químicas, donde una sustancia se oxida (pierde electrones) mientras otra se reduce (gana electrones) (Stumm & Morgan, 1996).

Estas reacciones son fundamentales en sistemas acuosos porque controlan la especiación, solubilidad y toxicidad de numerosos elementos, particularmente metales de transición (hierro, manganeso, cromo, arsénico) y nutrientes (nitrógeno, azufre) (Stumm & Morgan, 1996). El potencial redox (Eh) se relaciona con la actividad de electrones mediante la ecuación de Nernst a 25 °C:

$$Eh = E^0 + (0.0592V/n) \log([oxidante]/[reductor]) \quad (Ec. 5)$$

donde E^0 es el potencial estándar, R la constante de gases (8.314 J/[mol*K]), T la temperatura absoluta (K), n el número de electrones transferidos y, F la constante de Faraday (96485 J/[V*mol]) (Garrels & Christ, 1965).

Si bien el alcance metodológico de esta investigación no contempló la cuantificación directa de poblaciones microbianas, ni la identificación taxonómica específica (análisis microbiológico), se han establecido consideraciones indirectas sobre la actividad biológica a través del análisis del Potencial de Óxido-Reducción (ORP). Esta aproximación se fundamenta en que el ORP actúa como un indicador termodinámico maestro del estado del sistema, dado que la mayoría de los procesos metabólicos microbianos relevantes en aguas se basan en la transferencia de electrones (reacciones redox), el valor del ORP delimita las zonas de estabilidad metabólica.

Por lo tanto, en lugar de analizar la presencia de microorganismos, el ORP nos permite inferir la capacidad del medio para sustentar tipos específicos de actividad biológica:

- Valores altos (Ambientes Oxidantes – ORP Positivo) sugieren la presencia de oxígeno disuelto, favoreciendo el metabolismo de bacterias aerobias y limitando la actividad de patógenos anaerobios obligados.
- Valores bajos o negativos (Ambientes Reductores – ORP Negativo) indican el agotamiento de aceptores de electrones, creando nichos ecológicos favorables para bacterias sulfato-reductoras o metanogénicas.

2.5. Procesos biológicos relacionados con microorganismos

Los microorganismos desempeñan roles fundamentales como catalizadores biológicos de reacciones químicas en sistemas acuáticos, mediando transformaciones que serían cinéticamente lentas en ausencia de actividad biológica (Madigan *et al.*, 2019). Los procesos microbianos relacionados con la química del agua pueden clasificarse en varias categorías según su metabolismo y función ecológica.

a) Respiración aerobia y anaerobia

La respiración microbiana utiliza compuestos orgánicos como donadores de electrones y diversos aceptores de electrones según su disponibilidad. En condiciones aerobias, el oxígeno disuelto sirve como aceptor terminal de electrones, oxidando completamente la materia orgánica a CO_2 y H_2O (Madigan *et al.*, 2019). Este proceso es fundamental en la autodepuración natural de cuerpos de agua y el tratamiento biológico de aguas residuales.

b) Nitrificación y desnitrificación

El ciclo del nitrógeno en sistemas acuáticos está dominado por transformaciones microbianas. La nitrificación es un proceso quimioautotrófico de dos etapas donde bacterias como *Nitrosomonas* oxidan amonio (NH_4^+) a nitrito (NO_2^-), seguido por la oxidación de nitrito a nitrato (NO_3^-) por bacterias como *Nitrobacter* (Ward, 2008). Este proceso requiere oxígeno y es sensible al pH y temperatura.

La desnitrificación, en contraste, es un proceso anaerobio donde bacterias heterótrofas reducen nitrato a óxidos de nitrógeno gaseosos (NO , N_2O) y finalmente nitrógeno molecular (N_2), retornando nitrógeno fijo a la atmósfera (Zumft, 1997). Este proceso es crucial para la remoción biológica de nitrógeno en plantas de tratamiento y la atenuación natural de contaminación por nitratos en acuíferos.

c) Reducción y oxidación de azufre

Las bacterias sulfato-reductoras (BSR) reducen sulfato a sulfuro de hidrógeno (H_2S) en condiciones anaerobias, utilizando compuestos orgánicos o hidrógeno como donadores de electrones (Muyzer & Stams, 2008). Este proceso genera el olor característico a huevo podrido en sedimentos anóxicos y puede causar corrosión en infraestructura. El sulfuro producido puede precipitar metales pesados como sulfuros insolubles (eg. pirita), representando un mecanismo natural de inmovilización de contaminantes metálicos.

d) Degradación de contaminantes orgánicos

Diversos microorganismos degradan la solución mediante procesos aerobios (mineralización completa) y anaerobios (fermentación, respiración anaerobia). La biodegradación de hidrocarburos, compuestos aromáticos, pesticidas y fármacos en sistemas acuáticos, representa un servicio ecosistémico fundamental (Schwarzenbach *et al.*, 2003).

2.6. Principales procesos hidrogeoquímicos en el agua

La composición química del agua en un sistema natural o geoquímico es el resultado de una serie de procesos que ocurren desde que se precipita desde la atmósfera, evapora, escurre e infiltra, hasta que llega a un punto de descarga en sitios conocidos como manantiales o incluso puntos de mayor volumen en ríos subterráneos. Desde el punto de vista biogeoquímico, el agua conforma la hidrósfera, la cual se considera un sistema geoquímico que interactúa con las otras esferas ambientales. En particular, la interacción con la litósfera se puede considerar también como el estudio de las aguas subterráneas, y se relaciona con los niveles superiores de la corteza terrestre incluyendo la capa más superficial constituida por la capa de suelo denominada pedósfera.

Aunque los procesos hidrogeoquímicos son muy amplios, dependiendo de manera específica en qué contexto o a qué sistema geológico se refiera, en este caso de estudio, se describirán dos procesos hidrogeoquímicos del agua subterránea, los cuales se inician con el proceso de infiltración al interior de la litósfera o endósfera.

En el momento que el agua meteórica inicia su trayectoria en la endósfera, se activan una serie de procesos hidrogeoquímicos de **interacción agua-roca** que tienen como consecuencia el cambio composicional de agua meteórica prístina a diferentes tipos de agua

subterránea. Este proceso, como se verá, dependerá de los flujos, tiempos de permanencia y composición del sustrato rocoso. Así mismo, otro proceso hidrogeoquímico de agua subterránea se refiere al proceso de **mezcla de agua** de composición meteórica con otros cuerpos de agua o soluciones en estado líquido o vapor-líquido de origen diverso, con los que puede entrar en contacto tales como el agua de origen hidrotermal, magmática, así como la interacción de diferentes niveles de acuíferos o incluso de fuentes contaminantes y por lo tanto de origen antropogénico.

A continuación, se describen con mayor detalle los procesos hidrogeoquímicos de agua subterránea: interacción agua-roca y de mezcla de agua hidrogeoquímica, como uno de los principales temas de este trabajo.

2.6.1. Interacción agua-roca

La interacción agua-roca comprende el conjunto de procesos fisicoquímicos que tienen lugar cuando el agua ya sea meteórica, subterránea o hidrotermal, entra en contacto con la matriz geológica (Drever, 1997). Este fenómeno es posible gracias a la naturaleza del agua como solvente geoquímico, cuya elevada constante dieléctrica reduce drásticamente las fuerzas de atracción electrostática entre los iones de la red cristalina mineral, facilitando su liberación.

La dinámica de estas reacciones depende intrínsecamente de parámetros termodinámicos como la temperatura, la presión y la composición del agua. En particular, el pH es una variable crítica controlada por el proceso de autoionización (o autoprotólisis) (Appelo & Postma, 2005), donde el equilibrio entre iones hidronio e hidroxilo, determina la agresividad del fluido frente a los minerales. Asimismo, la fuerza iónica y la conductividad eléctrica del fluido, evolucionan conforme aumenta la concentración de solutos disueltos derivados de la roca.

Este término engloba diversos mecanismos moleculares:

- **Disolución mineral:** Ocurre mediante la solvatación (o hidratación de un sistema sólido rocoso), proceso en el cual las moléculas de agua, debido a su carácter dipolar, rodean a los iones liberados orientando sus átomos de oxígeno o hidrógeno para estabilizarlos en solución.

- **Fenómenos de superficie:** La adhesión molecular permite que el agua interactúe con superficies minerales polares mediante enlaces de hidrógeno, facilitando procesos de adsorción-desorción e intercambio iónico.
- **Transformaciones químicas:** Incluye reacciones de hidrólisis y oxidación-reducción, las cuales alteran la mineralogía original y modifican la composición del fluido.

El intercambio agua-roca (Figura 2) es determinante para la calidad del agua subterránea, ya que la acción disolvente del agua transforma su composición prístina de manera natural y permite incorporar elementos relativamente contaminantes, o bien, promover su retención en la fase sólida mediante adsorción (Cortés-Pizarro, 2023). Este conjunto de procesos físicos, químicos y biológicos en la interfaz sólido-líquido, constituye el mecanismo geológico fundamental que en la superficie de la Tierra moldea el paisaje y en el subsuelo define la hidrogeoquímica global (Tóth, 2000).

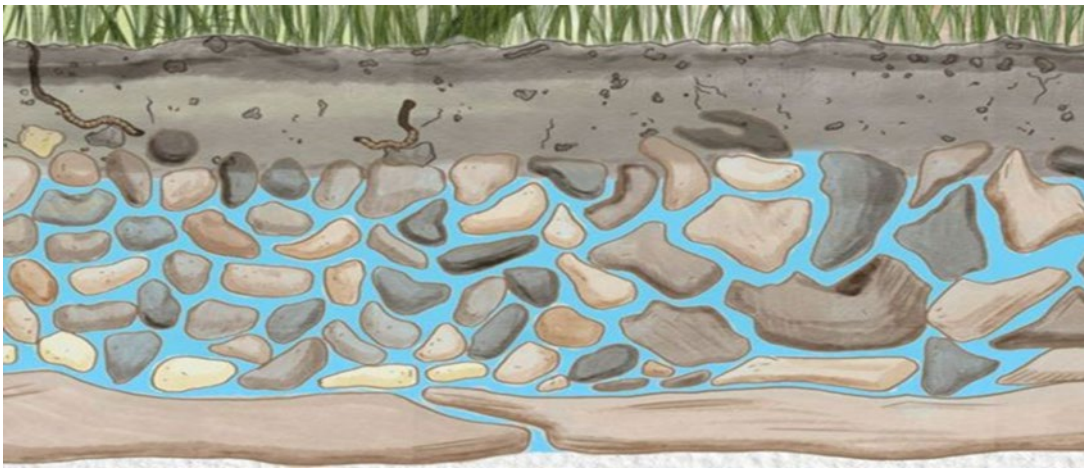


Figura 2. Muestra el proceso de interacción entre el agua que fluye por fisuras o huecos de la roca. Fuente: <https://www.nature.org/es-us/que-hacemos/nuestra-vision/perspectivas/aguas-subterранеas-nuestro-recurso-mas-valioso/>

2.6.2. Procesos de mezcla agua

Los procesos de mezcla hidrogeoquímica representan más que una simple convergencia física; constituyen una interacción termodinámica activa entre dos o más masas de agua subterránea o superficial denominada miembros extremos (*end members*). Este fenómeno, es crucial para comprender la evolución química y la calidad del recurso, ya que implica un reajuste de la fuerza iónica y del equilibrio químico (Appelo & Postma, 2005).

2.6.2.1. Composición de agua meteórica, fluvial, industrial, minera, hidrotermal

a) Agua meteórica (de recarga)

Constituye el solvente inicial del ciclo hidrológico. Su composición se caracteriza por una baja conductividad eléctrica (típicamente $< 100 \mu\text{S/cm}$), reflejo de una baja concentración de iones disueltos (Hem, 1985). Debido a su escasa interacción previa con minerales, su capacidad de solvatación es alta, aunque su carga de solutos depende primariamente del equilibrio con aerosoles atmosféricos y gases (Clark & Fritz, 1997).

b) Agua fluvial

La composición química de aguas superficiales refleja la integración de aportes meteóricos, escorrentía superficial, descarga de aguas subterráneas y, frecuentemente, influencias antropogénicas (Meybeck, 1987). La clasificación de Gibbs (1970) identifica tres mecanismos principales que pueden controlar la química de aguas fluviales: composición inicial de precipitación, tasas de meteorización de rocas, y tasas de evaporación-cristalización que dependen del clima y del volumen del sistema acuoso. La composición promedio del agua fluvial mundial muestra una tendencia iónica de $\text{HCO}_3^- > \text{Ca}^{2+} > \text{SiO}_2 > \text{SO}_4^{2-}$, reflejando la importancia de la meteorización, donde la constante dieléctrica del agua ha facilitado la disociación de silicatos y carbonatos (Berner & Berner, 2012).

c) Agua residual de la industria

Las aguas residuales industriales presentan una variabilidad extrema de composición y, por lo tanto, en su fuerza iónica y contenido de sólidos disueltos, lo que altera drásticamente la conductividad y la tensión superficial, dependiendo del tipo de proceso industrial (Tchobanoglous *et al.*, 2003). Las industrias metalúrgicas típicamente descargan aguas con elevadas concentraciones de metales pesados, pH frecuentemente ácido, y elevados sólidos totales disueltos (Salomons & Förstner, 1984).

d) Agua residual de la minería

El drenaje ácido de mina representa uno de los problemas ambientales más severos asociados con la minería de sulfuros metálicos (Nordstrom & Alpers, 1999), resultado de reacciones de

oxidación-reducción (Redox) de sulfuros metálicos. Este proceso genera una ionización intensa que reduce el pH a valores < 3 (alta concentración de iones hidronio, incrementando la solubilidad de metales traza y sulfatos, mediante la alteración de los potenciales redox (Stumm & Morgan, 1996).

e) Agua hidrotermal

Las aguas hidrotermales representan fluidos que han circulado a profundidad y presentan una temperatura elevada, interactuando intensamente con rocas bajo condiciones de presión y temperaturas elevadas (Giggenbach, 1988). El alto calor específico y la modificación de la constante del producto de solubilidad por la temperatura, permiten que estas aguas transporten elevadas concentraciones de sílice y electrolitos, manteniendo un equilibrio químico metaestable hasta su enfriamiento o mezcla. La composición química refleja equilibrio con minerales a alta temperatura y presenta elevadas concentraciones de sílice, cloruros, sulfatos, elementos traza y gases disueltos (Arnórsson *et al.*, 1983).

f) Fluidos y agua de origen geotérmico

Son fluidos derivados directamente del enfriamiento y cristalización de cuerpos magmáticos. Estos son ricos en compuestos volátiles como SO_2 y HCl , y suelen ser extremadamente corrosivos y ácidos (Giggenbach, 1992). La composición química final de un fluido geotérmico no solo depende de su origen, sino de la cinética de reacción con los minerales de la roca encajonante. A temperaturas superiores a los $150\text{ }^\circ\text{C}$, la solubilidad de minerales y la relación entre cationes (como Na/K o Na-K-Ca) se vuelven dependientes exclusivamente de la temperatura, lo que permite el uso de geotermómetros químicos para estimar las condiciones del reservorio (Arnórsson, 2000).

2.7. Componentes ideales (*end members*) y análisis de procesos de mezcla

Un componente ideal o *end member* en hidrogeoquímica se define como una composición química específica que se asume como un estándar y, por lo tanto, representa una referencia de una fuente o identificación de un proceso geoquímico particular dentro de un sistema acuoso. Estos miembros extremos constituyen los vértices de un espacio composicional multidimensional, donde cada muestra de agua puede ser representada como una combinación lineal de estos *end members* (Christophersen & Hooper, 1992).

La metodología más utilizada es el Análisis Estadístico Multivariado para la identificación de *end members* o sus cambios requiere el uso de técnicas estadísticas sofisticadas que permitan extraer información significativa de conjuntos de datos hidrogeoquímicos complejos. El Análisis de Componentes Principales (PCA) constituye una de las herramientas más utilizadas para este propósito, ya que permite reducir la dimensionalidad de los datos e identificar las direcciones de máxima variabilidad en el espacio composicional (Güler *et al.*, 2002).

Principalmente existen 2 procesos de mezcla hidrogeoquímica:

2.7.1. Mezcla conservativa

Representa el escenario donde los solutos se comportan de manera inerte. La acción disolvente del agua actúa meramente como medio de dilución, y las concentraciones finales dependen exclusivamente del balance de masas y las proporciones de mezcla, sin que ocurran cambios de fase o reacciones de transferencia de electrones (Appelo y Postma, 2005).

2.7.2. Mezcla no conservativa

Implica una ruptura del equilibrio químico inicial que desencadena reacciones complejas para alcanzar un nuevo estado de estabilidad termodinámica (Plummer *et al.*, 1990). Estos procesos incluyen:

- **Precipitación:** Ocurre cuando la mezcla induce una sobresaturación, superando el producto de solubilidad de ciertas especies minerales.
- **Adsorción y desorción:** Fenómenos de superficie donde iones son retenidos o liberados en la interfase sólido-líquido mediante fuerzas de Van der Waals (fisisorción) o enlaces químicos (quimisorción).
- **Intercambio iónico:** proceso fisicoquímico reversible en el cual los iones presentes en una fase líquida son intercambiados por iones de carga similar que se encuentran adsorbidos en la superficie de un sólido (intercambiador). En el contexto hidrogeológico, los principales intercambiadores son los minerales de arcilla, la materia orgánica y los óxidos metálicos (Appelo y Postma, 2005).

Capítulo III. Marco teórico 2:

Calidad y normatividad de agua



Asegurar que el agua que se utiliza y consume sea de buena calidad es fundamental para proteger la salud y evitar enfermedades transmitidas por el agua (Figura 3). Para lograrlo, es esencial definir y mantener actualizados los límites permisibles de sus características fisicoquímicas, microbiológicas y radioactivas. El control de la calidad del agua es esencial para la salud pública y la preservación del medio ambiente. De hecho, es importante considerar que el concepto de la calidad del agua es subjetivo y que dependerá del uso que se le quiera dar, es decir si se refiere a el agua de consumo humano, agua para uso recreativo o incluso para algún fin económico, ya sea industrial o agrícola. En este caso se hace referencia solo al agua de consumo humano, por lo que se define la forma convencional para referirse a diferentes niveles de calidad como el **Índice de calidad del agua (ICA)**, para después describir los diferentes tipos de contaminantes, en especial los elementos potencialmente tóxicos y concluir con una breve reseña de las normas nacionales e internacionales de control de calidad del agua para consumo humano.

3.1. Concepto de calidad del agua

La calidad del agua se refiere al conjunto de características físicas, químicas, biológicas y radioquímicas que determinan su idoneidad para un uso específico (Chapman, 1996). Estas características pueden evaluarse mediante diversos parámetros que se comparan con estándares preestablecidos según estudios experimentales, prácticos y el uso previsto.



Figura 3. Imagen que muestra la calidad del agua potable que se tiene acceso en México. Fuente: https://ecofiltro.mx/blogs/news/indicadores-de-calidad-del-agua-en-mexico?srltid=AfmBOooWDOm0NEaN5D_zefpbKxZ3YDq8Hcp_S-Qi9AmFOMkKIBl4HJ

3.2. Criterios de calidad del agua

Desde una perspectiva funcional, la calidad del agua se define en relación con su capacidad para satisfacer requisitos particulares. Por ejemplo, los criterios de calidad para agua potable difieren significativamente de los requeridos para uso industrial o agrícola (Jiménez-Cisneros, 2007). Esta naturaleza relativa hace que el concepto de “buena” o “mala” calidad solo tenga sentido cuando se especifica el uso previsto:

- **Agua potable:** Destinada al consumo humano, debe cumplir con estrictos estándares microbiológicos y fisicoquímicos establecidos por normativas nacionales de la Secretaría de Salud (SSA) bajo la norma NOM-127-SSA1-2021 e internacionales como la Organización Mundial de la Salud (OMS).
- **Agua superficial de ríos y lagos:** Se refiere al volumen de hídrico que fluye o se almacena sobre la corteza terrestre y que, debido a su accesibilidad y características fisicoquímicas, constituye la principal fuente de abastecimiento para el desarrollo socioeconómico y el equilibrio ecológico (Appelo & Postma, 2005).
- **Agua para uso agrícola:** Utilizada para riego, requiere evaluación de parámetros como salinidad, concentración de sodio, boro y otros elementos potencialmente fitotóxicos y seguir los límites máximos permisibles de la NOM-001-SEMARNAT-2021 (Escalona-Domenech *et al.*, 2024).
- **Agua para uso industrial:** Sus requisitos de calidad varían ampliamente según el sector industrial, por lo que dependerá del producto de generación, así como de

transformación como la minería o industria de la energía eléctrica. Por ejemplo, la industria electrónica requiere agua ultrapura, mientras que otros procesos pueden tolerar ciertos niveles de impurezas (Chapra, 2008).

- **Agua para uso recreativo:** Empleada en actividades como natación, navegación o pesca deportiva o turismo, como aguas hidrotermales. Se evalúan principalmente parámetros microbiológicos y de seguridad para los usuarios (Schijven *et al.*, 2011).

3.3. Índice de calidad del agua (ICA)

Un Índice de Calidad del Agua (ICA) es una herramienta que transforma grandes cantidades de datos sobre múltiples parámetros de calidad del agua en un valor único que representa el nivel de calidad en una escala simple y comprensible (Abbasi & Abbasi, 2012). Los ICAs fueron desarrollados para facilitar la comunicación de información sobre calidad del agua a gestores, tomadores de decisiones y público en general, quienes generalmente no son especialistas en el tema (Sargaonkar & Deshpande, 2003).

3.3.1. Concepto y objetivo del ICA

Como señala Ott (1978) pionero en el desarrollo de índices ambientales, un índice es “un agregado ponderado de múltiples parámetros que describe algún fenómeno de calidad ambiental”. Los ICAs presentan varias ventajas sobre el análisis individual de parámetros, ya que simplifican la interpretación de datos complejos, facilitan comparaciones temporales y espaciales, permiten evaluar tendencias, y proporcionan información sintetizada útil para la gestión del recurso (Tyagi *et al.*, 2013).

3.3.2. Metodología general del ICA

La metodología se puede llevar a cabo de diferentes maneras, sin embargo, en todos los casos se divide en tres etapas: i) selección de parámetros, ii) ponderación y iii) agregación de datos para incorporarlos a una escala convencional.

- **Selección de parámetros:** La selección de parámetros para medir la calidad del agua se realiza en función de los objetivos de gestión y las características ambientales del área de investigación. Se recomienda incluir múltiples variables que tengan un impacto significativo en la calidad del agua. Estas variables se derivan en cinco

categorías principales: nivel de oxígeno, eutrofización, aspectos de salud, características físicas y sustancias disueltas (Chidiac *et al.*, 2023).

- **Ponderación:** La ponderación en los índices de calidad del agua (ICA o WQI por sus siglas en inglés), se realiza asignando un peso a cada parámetro según su importancia e impacto en la calidad del agua. Este peso se determina generalmente a través de la opinión de expertos y depende de los límites permisibles establecidos por agencias internacionales y nacionales para el agua potable. De acuerdo con Chidiac *et al.* (2023) se siguen los siguientes pasos para la ponderación:
- **Asignación de pesos:** Cada parámetro recibe un peso relativo basado en su relevancia para la calidad del agua.
- **Normalización:** Los valores de los parámetros se transforman en una escala común (generalmente de 0 a 100) para que puedan ser comparados.
- **Cálculo del índice final:** Se multiplica el valor normalizado de cada parámetro por su peso asignado. Luego, se suman los resultados para obtener el valor final del índice.
- **Agregación:** Es la etapa final del proceso mediante el cual se combinan los valores de los subíndices de los parámetros individuales, junto con sus pesos asignados, para obtener un único valor que represente la calidad general del agua. Este valor final permite clasificar el agua en diferentes categorías de calidad. Los métodos de agregación utilizados en los ICA, dependen del tipo de índice.

3.3.3. Índice de calidad del agua (ICA) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) de México ha desarrollado y aplica un Índice de Calidad del Agua (ICA) para evaluar la calidad de los cuerpos de agua superficiales en el territorio nacional. Este índice forma parte del Sistema Nacional de Información del Agua (CONAGUA, 2020) y, se utiliza para monitorear la condición de ríos, lagos y embalses en México, apoyando la toma de decisiones en materia de gestión hídrica y política ambiental.

El ICA de CONAGUA se basa en el *National Science Foundation* (NSF-WQI), pero ha sido adaptado a las condiciones específicas de México, considerando las principales

problemáticas de contaminación del agua en el país, la disponibilidad de datos de monitoreo, y la capacidad técnica y financiera de las redes de medición existentes (CONAGUA, 2020).

El ICA de CONAGUA utiliza los siguientes parámetros con sus respectivos pesos:

- **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO):** 11 por ciento - Indica la cantidad de oxígeno necesaria para degradar materia orgánica biodegradable, siendo un indicador clave de contaminación orgánica.
- **Oxígeno Disuelto (OD):** 17 por ciento - Esencial para la vida acuática, su disminución indica contaminación y condiciones anóxicas.
- **Coliformes Fecales:** 16 por ciento - Indicadores de contaminación fecal y riesgo de presencia de patógenos.
- **pH:** 11 por ciento - Mide la acidez o alcalinidad del agua, afectando la disponibilidad de nutrientes y la toxicidad de contaminantes.
- **Sólidos Suspendidos Totales (SST):** 7 por ciento - Indica la cantidad de material particulado en suspensión, relacionado con turbidez y transporte de contaminantes.
- **Nitrógeno Total:** 10 por ciento - Nutriente esencial que en exceso causa eutrofización.
- **Fosfatos Totales:** 10 por ciento - Nutriente limitante en la mayoría de los ecosistemas acuáticos, su exceso promueve proliferación de algas.
- **Temperatura:** 10 por ciento - Afecta procesos químicos y biológicos, la solubilidad de gases y el metabolismo de organismos acuáticos.
- **Turbidez:** 8 por ciento - Mide la claridad del agua, afectando la penetración de luz y la fotosíntesis.

La suma de estos pesos es 100 por ciento, y reflejan la importancia relativa de cada parámetro según el juicio de expertos mexicanos en calidad del agua, considerando las principales problemáticas ambientales del país, donde la contaminación orgánica y la eutrofización son especialmente prevalentes (Mazari-Hiriart, 2008).

El valor resultante del ICA se clasifica en cinco categorías de calidad (CONAGUA, 2020):

- **Excelente (91-100):** Agua de calidad óptima, apta para todos los usos sin necesidad de tratamiento o con tratamiento mínimo. No presenta evidencia de contaminación.

- **Buena Calidad (71-90):** Agua con ligera contaminación, apta para consumo humano con tratamiento convencional, así como para uso agrícola, industrial y recreación. Puede presentar algunos problemas menores de calidad.
- **Calidad Aceptable (51-70):** Agua con contaminación moderada, requiere tratamiento potabilizador más exigente para consumo humano. Puede usarse para agricultura, industria y, con precauciones, para recreación.
- **Contaminada (26-50):** Agua con contaminación importante, no apta para consumo humano sin tratamiento extensivo. Uso limitado para agricultura e industria con tratamiento previo. No recomendable para recreación.
- **Fuertemente Contaminada (0-25):** Agua con contaminación severa, no apta para consumo humano ni para la mayoría de usos sin tratamiento intensivo. Representa riesgos ambientales y sanitarios significativos.

3.4. Tipos de contaminantes del agua

Los contaminantes del agua pueden clasificarse en cuatro categorías principales según su naturaleza: biológicos, químicos, físicos y radiológicos. Esta clasificación facilita la comprensión de sus fuentes, comportamiento en el ambiente y métodos de tratamiento.

3.4.1. Contaminantes biológicos

Los contaminantes biológicos incluyen microorganismos patógenos como bacterias, virus, protozoos y helmintos que pueden causar enfermedades transmitidas por el agua (Ashbolt, 2004). Entre las bacterias patógenas más relevantes se encuentran *Salmonella spp.*, coliformes fecales, *Giardia lamblia*, *Cryptosporidium*, *Shigella spp.*, *Vibrio cholerae*, *Escherichia coli* patógena y *Campylobacter jejuni*. Los virus entéricos como el virus de la hepatitis A, norovirus y rotavirus son responsables de millones de casos de gastroenteritis anualmente (Leclerc *et al.*, 2002; SSA, 2021).

3.4.2. Contaminantes químicos

Los contaminantes químicos representan la categoría más diversa y compleja, incluyendo tanto sustancias orgánicas como inorgánicas, ya sea de origen natural y antropogénico.

3.4.2.1. Contaminantes químicos orgánicos

Los contaminantes orgánicos incluyen una vasta gama de compuestos sintéticos y naturales. Entre los más preocupantes se encuentran los compuestos orgánicos persistentes (COPs), como los bifenilos policlorados (PCBs), dioxinas y furanos, que se bioacumulan en la cadena alimentaria y tienen efectos tóxicos, carcinogénicos y disruptores endocrinos (Jones & de Voogt, 1999).

Los plaguicidas, ampliamente utilizados en agricultura, incluyen insecticidas, herbicidas y fungicidas que generalmente pueden contaminar aguas superficiales y subterráneas a través de la escorrentía y lixiviación (Gilliom *et al.*, 2006). Los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs), generados por combustión incompleta de materia orgánica, son carcinógenos potentes presentes en aguas contaminadas por actividades industriales y urbanas (Abdel-Shafy & Mansour, 2016).

3.4.2.2. Contaminantes químicos inorgánicos o Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT)

Los contaminantes químicos inorgánicos incluyen metales pesados, metaloides, sales minerales, nutrientes en exceso, ácidos y bases. Los nitratos y fosfatos, aunque necesarios para la vida, se convierten en contaminantes cuando están presentes en concentraciones elevadas, causando eutrofización de cuerpos de agua (Smith *et al.*, 1999). Los nitratos en agua potable representan un riesgo particular para infantes, pudiendo causar metahemoglobinemia o “síndrome del bebé azul” (Fewtrell, 2004).

3.4.2.3. Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT)

Los elementos potencialmente tóxicos (EPT) son sustancias químicas que, cuando se acumulan en concentraciones elevadas en organismos vivos o en el ambiente, pueden causar efectos adversos para la salud humana, animal o vegetal (Tchounwou *et al.*, 2012).

Estos elementos incluyen tanto metales pesados, metaloides y algunos no metales, tales como arsénico, cadmio, cromo, mercurio, plomo, níquel, cobalto, zinc, talio, paladio, los cuales pueden ser extremadamente dañinos para los organismos vivos incluso en concentraciones

bajas (Tchounwou *et al.*, 2012) y representan una preocupación creciente para la salud pública y el medio ambiente a nivel mundial.

La presencia de EPT en diversos compartimentos ambientales como suelo, agua y aire, se ha incrementado significativamente debido a actividades antropogénicas como la minería, la industria, la agricultura intensiva y la eliminación inadecuada de residuos (Ali *et al.*, 2019).

Los metales pesados y metaloides merecen atención especial debido a su toxicidad, persistencia en el ambiente, capacidad de bioacumulación y amplia distribución en aguas contaminadas (Duffus, 2002). A continuación, se describen algunos EPT:

- **Plomo.** El plomo es uno de los contaminantes metálicos más persistentes y ubicuos en el ambiente. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) el plomo es responsable de aproximadamente 143,000 muertes al año a nivel mundial, principalmente en países en desarrollo (Landrigan *et al.*, 2018).
- **Mercurio.** El mercurio es un metal altamente tóxico que puede existir en formas elementales, inorgánicas y orgánicas. El mercurio es especialmente preocupante por su capacidad de biomagnificación en la cadena alimentaria acuática, particularmente como metilmercurio (Eagles-Smith *et al.*, 2018).
- **Cadmio.** La exposición crónica al cadmio se asocia con enfermedad renal, osteoporosis y varios tipos de cáncer (Genchi *et al.*, 2020).
- **Arsénico.** El arsénico es un metaloide ampliamente distribuido en la corteza terrestre. Es un carcinógeno humano confirmado asociado con cáncer de piel, pulmón y vejiga (Ng *et al.*, 2003). La contaminación por arsénico en agua potable afecta a más de 140 millones de personas en más de 70 países (Podgorski y Berg, 2020).
- **Cromo.** El cromo hexavalente (Cr VI) es la forma más tóxica de este elemento. El cromo hexavalente es un carcinógeno reconocido que puede causar cáncer de pulmón por inhalación (IARC, 2012).

3.4.3. Contaminantes físicos

Los contaminantes físicos afectan las propiedades físicas del agua, incluyendo temperatura, turbidez, color, olor y sabor. La contaminación térmica, causada principalmente por descargas de aguas de enfriamiento de plantas eléctricas e industrias, puede alterar el

equilibrio ecológico de cuerpos de agua al reducir la concentración de oxígeno disuelto y afectar el metabolismo de organismos acuáticos (Verones *et al.*, 2010).

3.4.4. Contaminantes radiológicos

Los contaminantes radiológicos incluyen isótopos radiactivos naturales y antropogénicos que emiten radiación ionizante. Entre los radionúclidos de origen natural más comunes en aguas subterráneas se encuentran el uranio, el radio y el radón, que pueden lixiviarse de formaciones geológicas (OMS, 2011).

3.5. Tipos de enfermedades relacionadas con los EPT

La exposición prolongada a elementos potencialmente tóxicos (EPT) está asociada con numerosos efectos adversos en la salud. Una característica crítica de muchos metales pesados es su tendencia a bioacumularse en organismos y biomagnificarse en cadenas alimentarias. Los organismos acuáticos pueden acumular metales en concentraciones de varios ordenes de magnitud superiores a las presentes en el agua circundante (Rainbow, 2002).

- **Neurotoxicidad.** El plomo, mercurio y arsénico son potentes neurotoxinas. La exposición prenatal e infantil a estos elementos puede resultar en déficits cognitivos permanentes, disminución del coeficiente intelectual y trastornos del neurodesarrollo (Grandjean & Landrigan, 2014). El plomo afecta directamente el desarrollo cerebral mediante la interferencia con neurotransmisores y proteínas de señalización sináptica.
- **Nefrotoxicidad.** El cadmio y el arsénico se acumulan preferentemente en los riñones, causando disfunción tubular renal y eventualmente enfermedad renal crónica. La enfermedad “Itai-Itai” en Japón, caracterizada por osteomalacia y disfunción renal, fue causada por contaminación crónica por cadmio (Nordberg *et al.*, 2018).
- **Hepatotoxicidad.** El arsénico, mercurio y plomo pueden causar daño hepático significativo. La exposición crónica a arsénico se asocia con hepatomegalia, fibrosis portal y cirrosis hepática (Liu *et al.*, 2009).
- **Carcinogénesis.** Varios EPT están clasificados como carcinógenos humanos por la Agencia Internacional para la Investigación sobre el Cáncer (IARC): i) arsénico: cáncer de piel, pulmón, vejiga y riñón (Grupo 1); ii) cadmio: cáncer de pulmón, próstata y riñón (Grupo 1); iii) cromo hexavalente: cáncer de pulmón (Grupo 1); iv)

compuestos inorgánicos de plomo: probablemente carcinógenos (Grupo 2^a). La carcinogénesis inducida por metales involucra múltiples mecanismos, incluyendo daño oxidativo al ADN, inhibición de la reparación del ADN y alteraciones epigenéticas (Valko *et al.*, 2015).

- **Toxicidad Cardiovascular.** La exposición a plomo y cadmio se ha asociado con hipertensión, enfermedad arterial periférica y enfermedad coronaria. Un metaanálisis reciente encontró una asociación significativa entre niveles sanguíneos de plomo y riesgo de enfermedad cardiovascular (Chowdhury *et al.*, 2018).
- **Efectos endócrinos.** Varios EPT funcionan como disruptores endócrinos. El cadmio puede imitar los efectos del estrógeno en tejidos diana, mientras que el plomo interfiere con la producción de hormonas tiroideas y esteroideas (Iavicoli *et al.*, 2009).

3.6. Normatividad nacional e internacional para la calidad del agua

Las normas de calidad del agua establecen los límites máximos permisibles de contaminantes y parámetros físicoquímicos que garantizan la inocuidad del recurso hídrico destinado al consumo humano.

Una norma o decreto en materia de calidad del agua es un instrumento jurídico-técnico que establece especificaciones, procedimientos y límites obligatorios para garantizar que el agua destinada al consumo humano sea segura y no represente riesgos para la salud (SSA, 2021). Estas regulaciones tienen carácter vinculante y su incumplimiento puede derivar en sanciones administrativas o legales. La elaboración de normas de calidad del agua es un proceso multidisciplinario que integra evidencia científica, estudios epidemiológicos, análisis de riesgo toxicológico y consideraciones técnico-económicas. Este proceso generalmente incluye las siguientes etapas:

- **Evaluación científica**

El fundamento principal de cualquier norma de calidad del agua es la evaluación del riesgo asociado a la exposición de contaminantes específicos. Los organismos reguladores revisan sistemáticamente la literatura científica disponible sobre los efectos en la salud de diversos compuestos químicos, microorganismos patógenos y parámetros físicos del agua (OMS, 2011).

- **Determinación de valores de referencia**

Estos valores se ajustan mediante factores de seguridad que consideran la variabilidad entre especies, la sensibilidad de poblaciones vulnerables (niños, mujeres embarazadas, ancianos) y las incertidumbres en los datos disponibles (EPA, 2015).

- **Consideraciones de factibilidad**

Aunque los límites ideales se establecen con base en criterios de salud, las normas también deben considerar la factibilidad técnica y económica de su implementación. Esto implica evaluar las tecnologías de tratamiento disponibles, los costos asociados y las capacidades de los sistemas de abastecimiento de agua (Ashbolt, 2004).

- **Consulta pública y consenso**

En muchos países, el proceso incluye períodos de consulta pública donde expertos, industria, organizaciones civiles y ciudadanos, pueden aportar comentarios y observaciones. Este proceso participativo fortalece la legitimidad y aplicabilidad de las normas.

En México, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS) son las autoridades competentes en materia de calidad del agua. La norma vigente es la NOM-127-SSA1-2021, que establece los límites permisibles de calidad y tratamientos para potabilización del agua para uso y consumo humano (SSA, 2021). La Organización Mundial de la Salud publica periódicamente las Guías para la Calidad del Agua de consumo (*Guidelines for Drinking-water Quality*), documento de referencia mundial que establece valores guía basados en evaluaciones de riesgo para la salud (WHO, 2011). Aunque estas guías no son legalmente vinculantes, sirven como base científica para que los países desarrollen sus propias normativas nacionales. Y la EPA establece y hace cumplir los Estándares Nacionales Primarios de Agua Potable (*National Primary Drinking Water Regulations*) bajo la autoridad de la Ley de Agua Potable Segura (*Safe Drinking Water Act*) (EPA, 2015).

3.6.1. Normativa oficial mexicana NOM-127-SSA1-2021

La Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 (SSA1, 2021) regula y establece los límites permisibles de calidad que debe cumplir el agua para uso y consumo humano en México. Su objetivo es garantizar que el agua sea segura para la salud, libre de contaminantes físicos, químicos, microbiológicos y radioactivos que puedan representar riesgos para las personas (SSA, 2021). A continuación, en la Tabla 1 se presentan los límites máximos permisibles de algunos parámetros fisicoquímicos que establece la NOM-127.

Tabla 1. Límites máximos permisibles de la Norma Oficial Mexicana para agua potable (NOM-127-SSA1-2021).

Especificaciones Químicas y Físicas:	Sustancias activas	Metales y Metaloides:
Cianuros totales: 0.07 mg/L Dureza total como CaCO ₃ : 500.00 mg/L Fluoruros como F ⁻ : 1.50 mg/L Nitrógeno amoniacal (N-NH ₃): 0.50 mg/L Nitrógeno de nitratos (N-NO ₃ ⁻): 11.00 mg/L Nitrógeno de nitritos (N-NO ₂ ⁻): 0.90 mg/L Sólidos disueltos totales: 1000.00 mg/L Sulfatos (SO ₄ ⁼): 400.00 mg/L	I azul de metileno: 0.50 mg/L pH: 6.5-8.5	Aluminio: 0.20 mg/L Arsénico: 0.025 mg/L Bario: 1.3 mg/L Cadmio: 0.005 mg/L Cobre: 2.00 mg/L Cromo total: 0.05 mg/L Hierro: 0.30 mg/L Manganeso: 0.15 mg/L Mercurio: 0.006 mg/L Níquel: 0.07 mg/L Plomo: 0.01 mg/L Selenio: 0.04 mg/L
**Para poblaciones menores a 50,000 habitantes los límites permisibles se ajustarán a 0.01 mg/L para el As y 0.003 mg/L para el Cd (Secretaría de Salud, 2021).		

3.6.2. Normativa internacional (OMS-2011 y EPA-2015)

Existen normas internacionales como: la OMS 2011, que provee un marco integral para la gestión preventiva del riesgo desde la fuente hasta el consumidor, con énfasis en la salud pública global, el acceso al agua potable segura debe ser fundamental y es uno de los derechos humanos básicos (OMS, 2011); y la US-EPA 2015, toma criterios ambientales para proteger la salud pública mediante estándares de agua potable para los EE. UU. (EPA, 2015). Además, existen normativas de calidad de agua potable en Latinoamérica. La tabla del Anexo III presenta una síntesis de los estándares de calidad de agua en Latinoamérica, recopilando legislaciones de nueve países (incluyendo Argentina, Bolivia, Brasil y Colombia) y contrastándolas con las guías internacionales. La tabla referida permite visualizar las variaciones en los umbrales de tolerancia para elementos traza y parámetros fisicoquímicos, proporcionando un contexto regulatorio multinacional para la interpretación de la calidad del

agua, estas normativas son: Código alimentario de Argentina (1994); Instituto Boliviano de Normalización y Calidad – NB-512 (1997); Ministerio de Salud de Brasil Portaria 36-GM (1990), Decreto 475 de Colombia (1998); Decreto Ejecutivo N.º 25991-S de Costa Rica (1997); Norma Chilena N° 409, Parte 1 (1984); Instituto Ecuatoriano de Obras Sanitarias (1992); Norma Salvadoreña Obligatoria 130701 (1997); y la Norma Guatemalteca Obligatoria 29001 (1998).

3.6.2.1. Límites permisibles OMS-2011 y EPA-2015

A continuación, se presentan los límites máximos permisibles de algunos parámetros fisicoquímicos seleccionados en agua de consumo, comparando los estándares internacionales de la OMS (2011) y la EPA (2015). Esta comparativa permite evaluar la calidad del recurso frente a criterios globales de salud.

Tabla 2. Límites permisibles de la Organización Mundial de la Salud y la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (OMS-2011 y EPA-2015)

OMS 2011	EPA US 2015
Arsénico: 0.01 mg/L Cadmio: 0.003 mg/L Cianuro: 0.07 mg/L Benceno: 0.01 mg/L Benzo(a)pireno: 0.0007 mg/L Sulfatos: 250 mg/L Turbidez: 5 (UNT) Trihalometanos totales: 0.1 mg/L PFAS: No estaban regulados en 2011 por OMS, pero se reconoce	Arsénico: 0.01 mg/L Cianuro: 0.2 mg/L Bario: 2 mg/L PFAS: PFOA y PFOS: 4 (ppt) PFNA, PFHxS y HFPO-DA (GenX): 10 ppt (MCL) Mezclas de PFAS reguladas mediante índice de peligrosidad con valor 1 Cobre: 1.3 mg/L Fluoruro: 4.0 mg/L Plomo: 0.015 mg/L

Capítulo IV.

Región del Municipio de Zinapécuaro (RMZ)

4.1. Localización del área de estudio

4.1.1. Localización y vías de acceso

La región del municipio de Zinapécuaro (RMZ) se localiza en la zona norte del estado de Michoacán, específicamente entre las coordenadas 19° 59' 20" de latitud norte y 100° 33' 01" de longitud oeste. La RMZ está situada en las laderas occidentales de la Sierra de San Andrés, que tiene una altura máxima de 3,960 m. s. n. m. en la cima del cerro San Andrés, mínima de 1,837 m. s. n. m. en la ribera oriental del lago de Cuitzeo y una altura promedio de 2,900 m. s. n. m. El CGLA abarca una extensión de 81 km², se encuentra a 200 km al noroeste de la Ciudad de México y a 80 km al este de Morelia.

Vías de Acceso Principales:

Para acceder a la RMZ, existen diversas rutas dependiendo del punto de partida:

- Desde el oeste (viniendo de Guadalajara): La ruta principal es la Autopista de Occidente México – Guadalajara (15D) en dirección a la Ciudad de México. Aproximadamente 10 km después de la caseta de cobro de Zinapécuaro, se debe tomar la salida señalizada como “Los Azufres, Jeráhuaro, Ucareo” y, al salir de la autopista, girar a la izquierda por la carretera libre en dirección a Morelia.
- Desde el este (viniendo de CDMX o Toluca): Se utiliza la misma Autopista de Occidente México – Guadalajara (15D), pero en dirección a Guadalajara. Después de

pasar la desviación a Maravatío, se debe continuar hasta encontrar la misma salida “Los Azufres, Jeráhuaro, Ucareo”.

- Desde el norte (viniendo de Celaya o Salvatierra): El trayecto se realiza por la Carretera Federal 51 hacia el sur. Al llegar a la zona de Acámbaro, es necesario tomar la Carretera Federal 120, que conecta directamente con Zinápécuaro.
- Y desde el sur (viniendo de Pátzcuaro): Se debe llegar primero a Morelia y tomar la Avenida Madero Oriente hasta salir de la ciudad. La ruta continúa por la Carretera Federal 126 (Morelia – Maravatío), pasando por las localidades de Charo e Indaparapeo hasta llegar al destino.

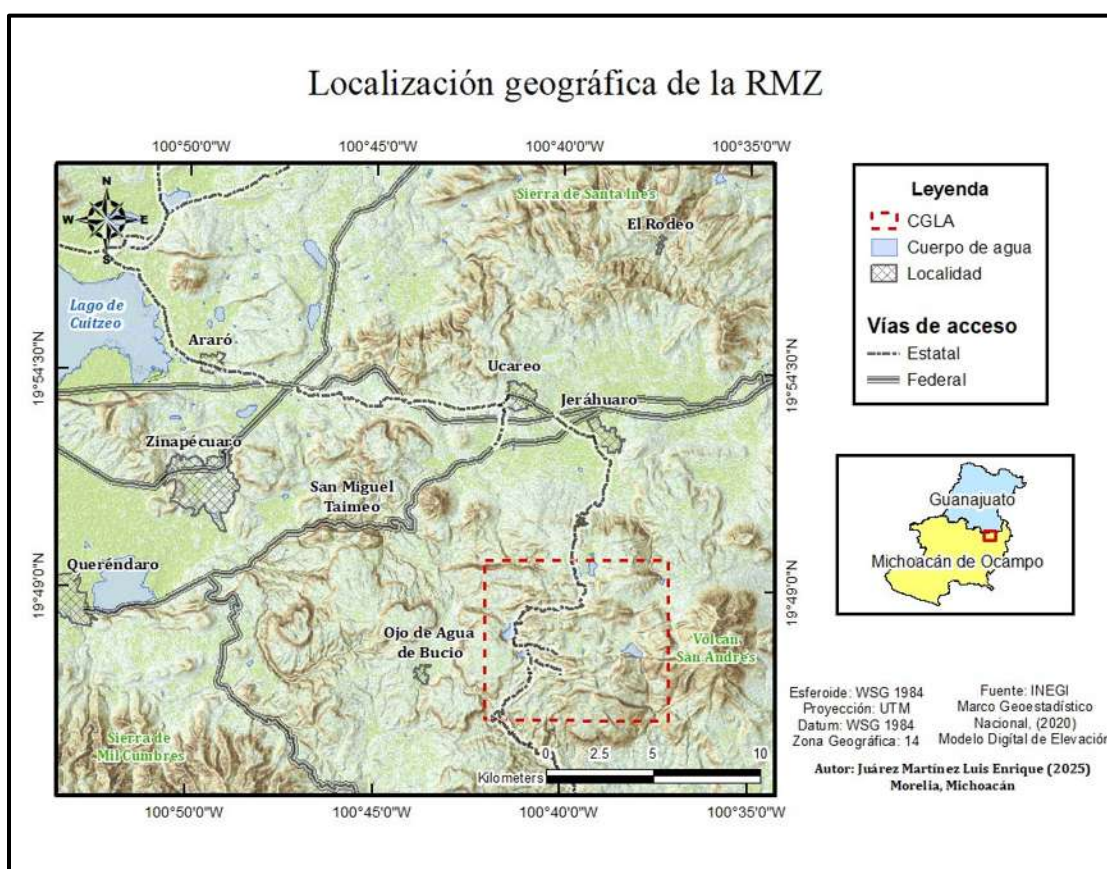


Figura 4. Mapa de localización geográfica de la RMZ, muestra las principales localidades y vías de acceso. Fuente: Elaboración propia

4.1.2. Asentamientos humanos

Según datos del Censo de Población y Vivienda realizado por el INEGI (2020), el Municipio de Zinápécuaro cuenta con una población total de 49,005 habitantes. De estos, el 51.72% corresponde a mujeres (25,345) y el 48.28% a hombres (23,660).

La estructura de la población es predominantemente joven, concentrándose los mayores grupos en los siguientes rangos de edad:

- 5 a 9 años: 4,523 habitantes
- 0 a 4 años: 4,422 habitantes

10 a 14 años: 4,406 habitantes Las tasas demográficas clave del municipio son las siguientes:

- Tasa de natalidad: 17.98 nacimientos por cada 1,000 habitantes.
- Tasa de mortalidad general: 7.28 fallecimientos por cada 1,000 habitantes.
- Tasa de mortalidad infantil: 1.14 fallecimientos por cada 1,000 nacimientos.

El idioma prevalente es el castellano, sin embargo, con base en el censo sobre la diversidad lingüística, se registraron 29 personas de 3 años o más que hablan una lengua indígena, de las cuales 12 son mujeres y 17 son hombres.

La distribución territorial indica que 29,135 habitantes residen en localidades urbanas (59.45%), mientras que 19,870 habitan en localidades rurales (40.55%). El municipio está conformado por 88 localidades distribuidas en 5 tenencias: Ojo de Agua de Bucio, Jeráhuaro, Ucareo, San Pedro Bocaneo y Araró. La cabecera municipal, Zinapécuaro de Figueroa, constituye la localidad más poblada con aproximadamente 16,905 habitantes de acuerdo con el censo del INEGI en el 2020, por su parte, la localidad más pequeña registrada es Ojo de Agua de Bucio con 1,360 habitantes; otras localidades relevantes de la región son: Araró, Ucareo, Jeráhuaro, La Yerbabuena, Taimeo el Chico y San Miguel Taimeo.

Las principales actividades económicas varían desde la fruticultura (Jeráhuaro, Ucareo), San Pedro Bocaneo (fruticultura y el comercio en general), mientras que Araró y la cabecera municipal se dedican a la agricultura, minería, comercio y turismo.

4.1.3. Índices de pobreza y marginalidad

La Región Oriente de Michoacán (ROM) en donde se encuentra ubicada la RMZ enfrenta altos niveles de pobreza multidimensional y carencias sociales, afectando la salud de su población. La región tiene niveles de pobreza superiores a la media estatal (14.7 %) y nacional (21.5 %). La pobreza limita el acceso a agua potable, saneamiento y atención médica, exacerbando la ERC (Hernández-Santoyo, 2025).

Los **índices de pobreza** para Zinapécuaro, basados en datos de CONEVAL 2020 (Hernández-Santoyo, 2025), son:

- Pobreza extrema: 7.8 % de la población.
- Pobreza moderada: 44.7 % de la población.
- Población vulnerable por carencia social: 38.4 %.
- Población vulnerable por ingreso: 3.0 %.
- Población no pobre y no vulnerable: 6.1 %.

Carencias de Derechos Sociales e Infraestructura de Salud (Hernández-Santoyo, 2025):

- Carencia por acceso a la seguridad social: 78.7 %.
- Carencia por acceso a los servicios de salud: 41.6 %.
- Rezago educativo: 30.6 %.
- Carencia por acceso a la alimentación: 23.0 %.
- Carencia por acceso a los servicios básicos en la vivienda: 8.9 %.
- Carencia por calidad y espacios de la vivienda: 5.2 %.
- Personal médico: Zinapécuaro presenta una de las tasas más bajas de personal médico, con aproximadamente 2.1 médicos por cada 1000 habitantes.

4.1.4. Clima

En la zona de estudio se presentan 6 climas, predominando un clima templado a semifrío con características subhúmedas (ver Figura 5). Las principales diferencias se observan en los índices de presión y temperatura, lo cual está directamente relacionado con la altitud de la región, que supera los 2,000 m s. n. m. de acuerdo con el mapa de CONABIO escala 1:1 000 000 con la clasificación de Köppen, modificada por García, (1998). Las áreas más semicálidas corresponden a las planicies en la zona lacustre del Lago de Cuitzeo, que son las zonas ubicadas a mayor distancia del Volcán San Andrés. En la figura 5 se presenta una división de climas de la RMZ.

A continuación, se describe la clasificación climática utilizada, detallando las características de cada clave:

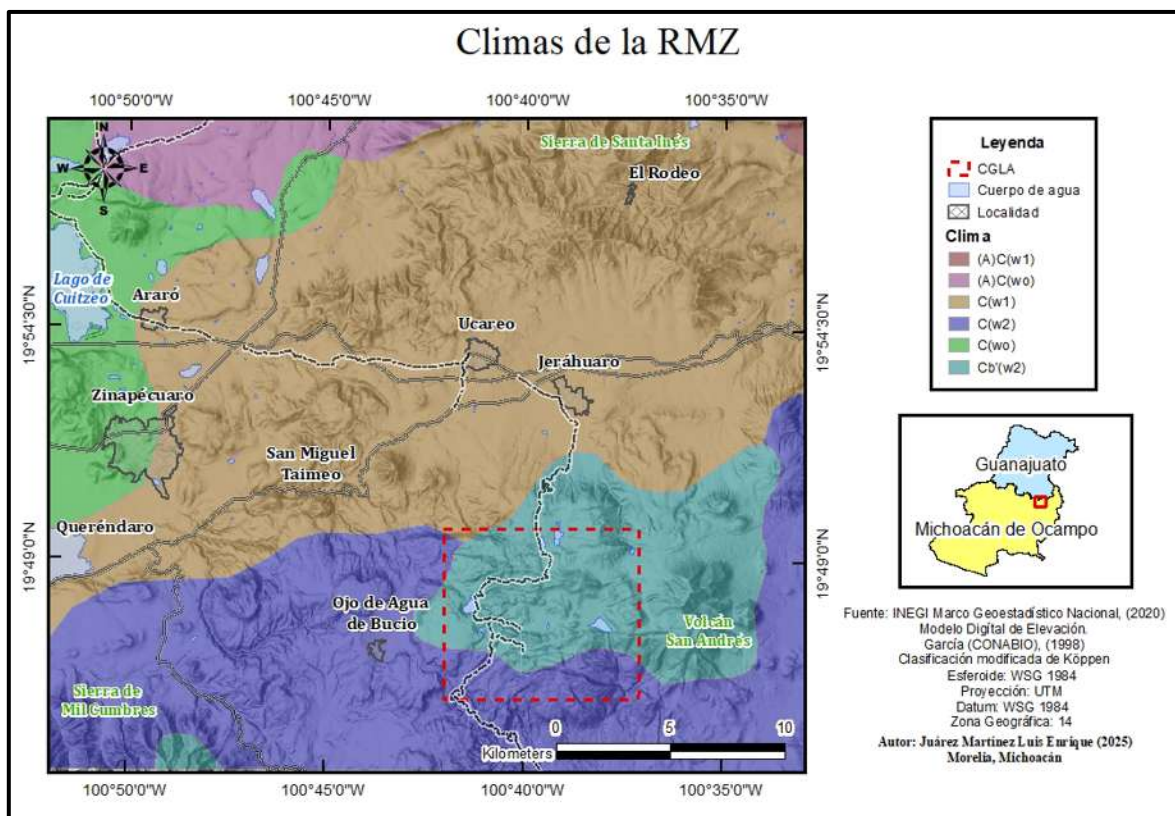


Figura 5. Mapa de climas que existen en la RMZ de acuerdo con los polígonos de CONABIO, 1998. Fuente: modificado de García (CONABIO), (1998).

Climas Templados Subhúmedos

Este clima se ubica en la periferia del Campo Geotérmico Los Azufres (CGLA), en color morado al sur del CGLA y la RMZ abarcando desde el este hasta el oeste coincidiendo con las elevaciones topográficas de la Sierra de Mil Cumbres y la localidad de Ojo de Agua de Bucio, en color café se ubica abarcando la franja central del mapa, extendiéndose de oeste a este y cubriendo localidades como Ucareo, Jeráhuaro y extendiéndose hacia el norte hacia la Sierra de Santa Inés y en color verde se encuentra principalmente en la dirección oeste, bordeando la zona lacustre del Lago de Cuitzeo y la localidad de Araró. Ocupa la mayor zona de la RMZ. La temperatura media anual oscila entre 12 °C y 18 °C. Sin embargo, existe registro de temperaturas extremas entre -3 °C y 22 °C. La precipitación se refiere a lluvias de verano, con una precipitación menor a 40 mm en el mes más seco. El porcentaje de lluvia invernal representa entre el 5% y el 10.2% del total anual.

Se han identificado tres variantes de clima templado a subhúmedo, la diferencia entre sus variantes radica en el índice de Precipitación/Temperatura (P/T) de acuerdo con la clasificación de Köppen modificado por García, (1998):

- **C(w0):** Templado subhúmedo con un índice P/T menor a 43.2.
- **C(w1):** Templado subhúmedo con un índice P/T entre 43.2 y 55.
- **C(w2):** Templado subhúmedo con un índice P/T mayor a 55.

Clima Semifrío Subhúmedo

Este clima se ubica en la parte sureste (color turquesa), su distribución está claramente asociada a las zonas de mayor elevación topográfica de esa sección, cubriendo específicamente el área circundante al Volcán San Andrés y abarcando la mayor porción del CGLA. Ocupa la segunda porción más grande de zona de la RMZ. La clave de este clima de acuerdo con la clasificación de Köppen modificado por García (CONABIO), (1998) es **Cb'(w2)** y se define como un clima semifrío y subhúmedo con un verano largo y fresco.

La temperatura: La media anual se encuentra entre 5 °C y 12 °C. La temperatura del mes más frío varía de -3 °C a 18 °C, mientras que la del mes más cálido no supera los 22 °C. La precipitación: Menos de 40 mm en el mes más seco, con un régimen de lluvias de verano y un porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total (García, 1998).

Climas Semicálidos Subhúmedos

Este clima se ubica en el noreste (color marrón) y noroeste (color rosa) de la región, al norte de Araró y tomando ya porción del estado de Guanajuato, se distribuye de este a oeste como se observa en la figura 5. Ocupa la menor zona de la RMZ. La temperatura media anual es superior a 18 °C. El mes más frío registra una temperatura por debajo de 18 °C, y el mes más cálido supera los 22 °C. Las lluvias de verano tienen un índice P/T entre 43.2 y 55%. La precipitación anual total se encuentra entre 500 y 2,500 mm, y la del mes más seco varía de 0 a 60 mm (García (CONABIO), 1998).

Las variantes (A)C(w1) y (A)C(w0) comparten las siguientes condiciones y La clave de este clima de acuerdo con la clasificación de Köppen modificado por García, (1998) es: **(A)C(w1):** con humedad media y **(A)C(w0):** con baja humedad.

4.1.5. Vegetación y uso de suelo

De acuerdo con un estudio de la CONAFOR (2014), la vegetación en el municipio de Zinapécuaro, especialmente en las zonas montañosas que forman parte de la sierra de San Andrés o de Los Azufres, se clasifica predominantemente como bosque templado. Al estar ubicado en la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico Transversal, el paisaje se caracteriza por una sucesión de vegetación que cambia con la altitud. De las mayores a las menores alturas:

Bosque de Coníferas de Alta Montaña (2,600 – 3,100 m s. n. m.): Se localiza en las cumbres de la Sierra de San Andrés y Mil Cumbres. Está formado por rodales puros o casi puros donde co-dominan el oyamel (*Abies religiosa*) y el pino (*Pinus pseudostrobus*). Esta es la fracción de bosque mejor conservada y constituye la principal fuente de recarga de agua para el río Zinapécuaro. Un estudio de zonificación agroecológica de 2023 (Aguilar-Sánchez & Aguilar-Sánchez) clasifica estas tierras como aptas exclusivamente para la conservación.

Bosque Mixto Pino-Encino (1,900 – 2,800 m s. n. m.): Considerado por el ayuntamiento de Zinapécuaro como el ecosistema dominante en el municipio. Las especies más frecuentes son *Pinus pseudostrobus*, *P. michoacana*, *P. leiophylla*, *Quercus castanea*, *Q. laurina* y *Q. obtusata*. El sotobosque (la vegetación de menor altura) se compone de especies como *Arctostaphylos pungens*, *Ribes ciliatum* y diversos helechos.

Matorral Espinoso y Vegetación Secundaria <1900 m s. n. m.: Ubicado en las partes más bajas, secas y de origen volcánico. Aquí predominan especies xerófilas como *Acacia farnesiana* (huizache) y *Mimosa biuncifera*, junto con pastizales robustos. Gran parte de esta vegetación es el resultado del desmonte histórico para la agricultura y ganadería. El mismo estudio de 2023 advierte sobre la degradación del suelo en estas áreas y recomienda su restauración con cubierta forestal.

En relación con la distribución por porcentaje, de acuerdo con datos del gobierno municipal (CPLADEM, 2022) e INEGI para el año 2020, la distribución del uso de suelo en la zona de estudio es la siguiente: **Bosque**, constituyendo la cobertura dominante: 11,950 hectáreas (27.7% de la superficie total); **Cultivos** representando el segundo uso más extenso: 11,237.9 hectáreas (26.6%); **Matorral** predominando en la zona norte de la región: 6,151.3 hectáreas

(14.3%): **Lago de Cuitzeo**: 6,158.9 hectáreas (14.3%); **Pastizales**: 3,600.7 hectáreas (8.4%) y finalmente **Asentamientos humanos**: 2,016.8 hectáreas (4.7%).

4.2. Marco Geológico de la RMZ

4.2.1. Basamento relativo: La Sierra de Mil Cumbres

Geológicamente, la RMZ se caracteriza por unidades predominantemente volcánicas, cuyas edades abarcan desde el Mioceno hasta el Pleistoceno. La zona de estudio se ubica dentro del Cinturón Volcánico Transmexicano y, a su vez, del Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato (Pinti *et al.*, 2013).

El basamento de la región, con un espesor estimado de 3 km, está constituido por la unidad conocida como Andesita Mil Cumbres (23-18.1-5.9 Ma) (Pérez-Esquivias *et al.*, 2010; Pinti *et al.*, 2013). Esta se compone de andesitas basálticas a dacíticas del Mioceno Superior al Plioceno. Este basamento se caracteriza por un vulcanismo de tipo bimodal, cuya evolución a través de múltiples etapas eruptivas generó una compleja morfología superficial. Dicha morfología se manifiesta en una diversidad de depósitos volcánicos, entre los que destacan ignimbritas, flujos y domos de lava, y conos de ceniza.

4.2.2. Campo Volcánico Michoacán Guanajuato (CVMG)

Sobreyaciendo a las diferentes unidades del basamento miocénico se encuentran diferentes edificios volcánicos relacionados con el Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato (CVMG), el cual es reconocido como uno de los campos volcánicos monogenéticos más grandes del mundo. Se extiende por aproximadamente 40,000 km² entre ambos estados y contiene más de 1,200 estructuras volcánicas, incluyendo conos, escudos, domos, maares, flujos de lava fisural y un estratovolcán (Hasenaka & Carmichael, 1985). La actividad volcánica en el CVMG comenzó hace aproximadamente 3 millones de años y ha mostrado una migración constante hacia el suroeste. Su evolución se puede resumir en las siguientes etapas (Jurado-Calderón, 2025):

- **Plioceno (~3-5 Ma):** Durante este periodo inicial, el vulcanismo se concentró en áreas como Uruapan, Tepalcatepec, Ixtlán de los Hervores y Cuitzeo.

- **Plioceno tardío – Pleistoceno temprano (3-1 Ma):** Esta fase se caracterizó por la formación de volcanes tipo escudo y conos compuestos de composición andesítica-dacítica.
- **Último millón de años:** El vulcanismo más joven se ha localizado principalmente en la porción sur del CVMG. Esta actividad reciente ha formado los edificios monogenéticos más conocidos, como conos de escoria y volcanes escudo, que se agrupan en regiones clave como Tancítaro, Tacámbaro, Pátzcuaro-Morelia y Queréndaro-Zinapécuaro. Sobreyaciendo a las unidades del basamento en la región de Zinapécuaro han sido reportadas una serie de lavas andesíticas y andesitas basálticas que sobreyacen a la secuencia miocénica y que son pertenecientes a la Unidad Andesítica de Zinapécuaro (0.87-0.85 Ma; Figura 6).

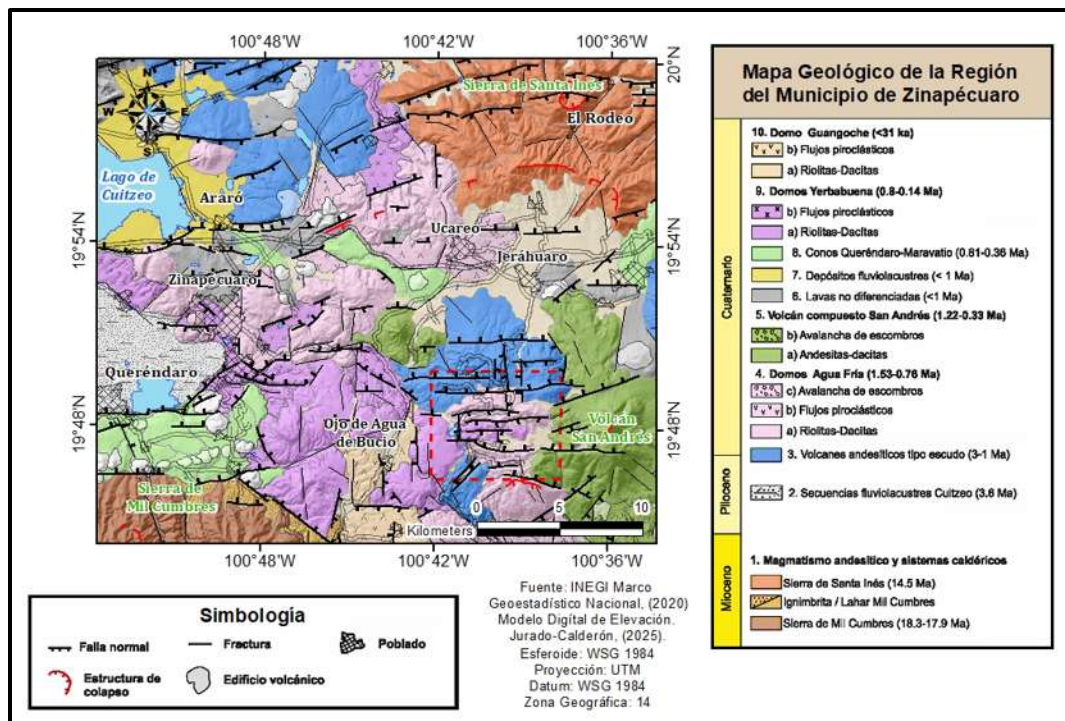


Figura 6. Mapa Geológico de la Región del Municipio de Zinapécuaro. Fuente: modificado de Jurado-Calderón (2025).

4.2.3. Campo Geotérmico Los Azufres (CGLA)

El Campo Geotérmico Los Azufres (CGLA) destaca como la segunda planta geotérmica más importante de México, superada únicamente por Cerro Prieto en Baja California. Esta instalación contribuye significativamente a que el país se posicione en el sexto lugar mundial en generación geotermoeléctrica. Hasta la fecha, se han perforado 80 pozos con

profundidades que varían considerablemente, oscilando entre los 600 y los 3,500 metros. De este total, aproximadamente 30 pozos se mantienen en producción continua y tres se utilizan para inyección (Mendoza-Rangel *et al.*, 2004; Núñez-Hernández, 2019).

Desde el punto de vista geológico, se estima que el vulcanismo en Los Azufres inició hace 1.57 millones de años, originado por el ascenso de magma a través de fallas corticales que dieron lugar a las diversas estructuras de la zona. La actividad magmática más reciente data del Holoceno, hace unos 26,000 años, y sus productos (las rocas y cenizas de esa erupción) son visibles en el volcán Guangoche (Jurado-Calderón, 2025; Pérez-Esquivias *et al.*, 2010).

Sin embargo, el reservorio o yacimiento geotérmico del CGLA se encuentra alojado en unidades de la Sierra de Mil Cumbres ubicadas en profundidades de 700 a 2,000 m, en los pozos de perforación del CGLA. Estas unidades desplazadas, que constituyen la roca huésped del sistema, exhiben un intenso fracturamiento de carácter subvertical (70°-90°). Es precisamente esta característica la que define la permeabilidad y la capacidad de almacenamiento del reservorio geotérmico (2.0 L/s/km² para la cuenca del sur Tejamaniles y 3.8 L/s/km² para la cuenca del norte Marítaro) (Birkle *et al.*, 1997; Jurado-Calderón, 2025; Pérez-Esquivias *et al.*, 2010).

El campo geotérmico se divide en dos zonas productivas bien diferenciadas (Abuharara, 2017):

- 1) **Zona Norte (Marítaro):** El reservorio está albergado por la andesita Mil Cumbres. Este reservorio está cubierto por la riolita Agua Fría, que actúa como capa de sellado.
- 2) **Zona Sur (Tejamaniles):** Esta zona presenta las temperaturas más altas del campo y posee un reservorio más somero. Litológicamente, está compuesta por tres unidades: la andesita Mil Cumbres, la riolita Agua Fría y la dacita Tejamaniles.

Estructuralmente, el yacimiento geotérmico de Los Azufres es controlado por la Falla Huajúmbaro-Zinapécuaro (NO-SE). Este sistema tectónico ha provocado un importante desplazamiento en las rocas del subsuelo. Esto se refleja claramente en la profundidad de las rocas miocénicas: mientras que en la parte norte se ubican a 1,200 metros, en la parte sur se encuentran a solo 700 metros de profundidad. Ambas zonas están cubiertas por una unidad superficial de rocas cuaternarias con un espesor aproximado de 500 metros.

Un factor importante para destacar consiste que la RMZ ha registrado diferentes eventos de deformación por fallas y fracturas, lo cual por un lado propició la conformación de un sistema hidrotermal del CGLA y por el otro lado, sugiere una permeabilidad secundaria que influye en forma determinante en los procesos hidrológicos de recarga y específicamente de infiltración.

4.3. Hidrología de la RMZ

La Figura 7 ilustra la localización hidrológica de la RMZ, la cual está ubicada entre dos grandes Regiones Hidrográficas (RH), separadas en un punto de cambio de máxima pendiente por una línea verde punteada. Al norte se ubica la RH-12 de la cuenca Lerma-Santiago, que abarca la mayor parte de la zona de estudio, mientras que al sureste se encuentra la RH-18 de la cuenca Balsas. Al sureste del mismo mapa (Figura 7), es importante destacar la localización hidrológica del CGLA, donde se puede observar que se ubica justo en el parteaguas de las dos grandes cuencas RH-12 y RH-18, revelando la importancia de cualquier anomalía hidrológica relacionada a su proceso de extracción o potenciales pérdidas de emisión de fluidos.

De hecho, de acuerdo con Corona-Chávez *et al.* (2022), la fisiografía de ambas vertientes de las cuencas regionales se caracteriza por presentar pendientes pronunciadas de más de 35° y un marcado gradiente topográfico, registrando diferencias de altura de hasta 1000 m entre los parteaguas y las planicies. Estos autores sugieren que los manantiales emergen tanto en las zonas altas como bajas de la sierra, vinculados a estos desniveles y a la heterogeneidad de las capas geológicas. Esta estructura sugiere la existencia de procesos de contaminación que confluyen hacia las zonas de planicie y alimentan los ríos bajos (Corona-Chávez *et al.*, 2022).

En este estudio nos enfocaremos solo en describir los aspectos de la cuenca RH-12 Lerma-Santiago, en particular de la RMZ que representa la principal irrigación de la ladera oeste de la Sierra de San Andrés.

La Región Hidrológica RH-12 Lerma-Santiago a nivel regional está situada en el centro-occidente del país, drena una superficie total de 182,460.14 km². Dicha región comprende la totalidad de los estados de Aguascalientes y Colima, así como porciones de Guanajuato, Jalisco, Estado de México, Michoacán, Nayarit, Querétaro y Zacatecas.

Mientras que para la región hidrológica RH-18 Balsas se tomó la subregión Medio Balsas, de esta subregión se tomó la cuenca Cutzamala y de esta cuenca se tomó la subcuenca Río Tuxpan.

4.3.1. Antecedentes de estudios hidrológicos de la RMZ

El primer estudio de la RMZ que se consultó es el de Hernández (1930), el cual reporta una precipitación media anual de 744 mm y una temperatura media de 17.7 °C. El autor observa procesos de deforestación y de erosión en la región de Ucareo y ya en ese momento, indica un panorama hidrológico comprometido. Observa también que las fuentes de agua locales, como los manantiales, presentan caudales variables, caracterizándose por un bajo rendimiento y alta turbidez, con la notable excepción del manantial de Agua Fría, que ofrece agua potable y abundante. Identifica el problema de flujos de agua en las barrancas y canales formados por la erosión, los cuales actúan como drenes naturales e inhiben la acumulación de aguas subterráneas. Como solución, el autor propone un enfoque integral: implementar un sistema de conducción por gravedad para aprovechar las aguas del manantial de Agua Fría, reforestar los alrededores, conservar las masas forestales de la sierra, y construir represas para mitigar la erosión y proteger las fuentes de agua.

Birkle y colaboradores (2001) utilizaron datos de 14 estaciones climatológicas (periodo 1955-1979) y por medio de mediciones hidrométricas, evaluaron los componentes del balance hídrico de la región. Determinaron una precipitación total anual de 223,000,000 m³ lo que corresponde a una precipitación anual promedio de 1,330 mm/m² en el área de estudio (183 km²), de la cual estimaron que el 48% del volumen de agua meteórica se “pierde” por evapotranspiración. Estos autores también calcularon una tasa de infiltración anual promedio de 446 mm/m² asociada a un volumen anual de 82,000,000 m³, por lo tanto, estimaron una recarga disponible para las aguas subterráneas. Adicionalmente, Birkle & Merkel (2000) mencionaron que la fracturación de las formaciones volcánicas facilita la percolación profunda de agua meteórica reciente.

El estudio hidrogeoquímico de González-Partida *et al.* (2000) se centró en estudiar el agua de los pozos del CGLA y su sistema hidrológico productivo. Estos autores establecieron que el agua extraída por los pozos del campo geotérmico corresponde a facies clorurada-sódicas (Cl⁻-Na⁺). Esta composición es característica de una salmuera geotérmica profunda que ha

alcanzado el equilibrio termodinámico con la roca reservorio a temperaturas estimadas entre 280 y 340 °C.

González-Partida *et al.* (2000) también diferenciaron las zonas de producción, identificando que los “pozos de mezcla” extraen fluido de una zona de líquido dominante, mientras que los pozos de vapor seco producen a partir de una zona bifásica (vapor-líquido). En contraparte, los manantiales superficiales localizados dentro del campo, exhiben facies tipo sulfatada-ácida. Esta firma geoquímica sugiere que el agua de producción geotérmica se trata de aguas profundas que han tenido una importante recarga de agua de origen meteórico, las cuales han sido sucesivamente calentadas e “influenciadas” por vapores geotérmicos profundos.

Birkle & Merkel (2000) realizaron un estudio que combinó el muestreo de aguas de origen geotérmico (pozos y presas de enfriamiento), muestras de flujos de agua de río y manantiales de aguas termales. A partir de sus resultados destacan que existen claras evidencias de contaminación tanto en aguas superficiales como en acuíferos superficiales y profundos. Específicamente, detectaron concentraciones elevadas de elementos traza (como Fe, Mn, As) y otros constituyentes (como B, F, Cl⁻ y Na⁺) en los ríos situados dentro y fuera del campo geotérmico. Estos niveles superan los estándares internacionales de calidad para agua potable establecidos por la EPA y la OMS. Adicionalmente, los autores reportaron un severo proceso de salinización del suelo. Este fenómeno es atribuido a la evaporación de las salmueras geotérmicas, lo cual induce la precipitación de sales y la formación de costras salinas, tornando infértiles los suelos afectados.

En su estudio del sistema geotérmico Araró-Zimirao, Pérez-Martínez *et al.* (2021) muestrearon manantiales termales de esta región baja de la RMZ e identificaron los mecanismos de transporte y movilidad del mercurio (Hg) entre las distintas matrices ambientales (agua, suelo y atmósfera). Los autores determinaron que los procesos geoquímicos clave que controlan el ciclo del Hg se refieren a procesos de volatilización y oxidación, seguidos de una deposición heterogénea y compleja. En lo referente a la especiación química en la fase acuosa, el estudio identificó que las formas predominantes son el mercurio elemental disuelto (Hg⁰_(ac)) y los complejos clorurados HgCl₂ y HgCl₃⁻. Además, se estableció que la abundancia del Hg⁰_(ac) es considerablemente menor en comparación con la del ion mercúrico (Hg²⁺).

Un trabajo mucho más reciente se refiere a la tesis doctoral de Núñez-Hernández (2019), la cual desarrolló un estudio hidrogeoquímico de pozos del Campo Geotérmico de Los Azufres (CGLA) y de manantiales de la RMZ. Esta autora identificó diferentes tipos de agua presentes (sódico-cloruradas, ácido-sulfatadas y bicarbonatadas), hipotetizando estas variaciones en relación con su interacción con las rocas y la influencia de los procesos de reinyección en la composición isotópica de los fluidos.

Núñez-Hernández (2019) presenta abundantes datos de isótopos estables de $\delta^{18}\text{O}$ y δD considerando diferentes temporalidades, variaciones de temperatura de ebullición y separación de fases en el yacimiento, así como la dispersión de las aguas de salmueras reinyectadas. Como González-Partida (2000), encontró una clara relación de procesos de mezcla de agua meteórica como recarga de las aguas productoras del CGLA, así como una relación termodinámica compleja. El estudio evaluó los procesos de interacción agua-roca y la influencia de la reinyección en la composición isotópica de los fluidos. Se documentó una evolución isotópica temporal significativa en los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y δD . Esta evolución se atribuyó a procesos de ebullición y separación de fases dentro del yacimiento.

4.3.2. Fuentes de abastecimiento de agua de la RMZ

Con base en la información del INEGI y de comunicación directa con la población del municipio de Zinapécuaro, las fuentes primarias de abastecimiento de agua potable para la RMZ se refieren principalmente al aprovechamiento de los manantiales (ojos de agua), dada su alta concentración en la zona, mientras que, en las zonas bajas, además de los manantiales, hacia la cabecera municipal se han excavado algunos pozos. Es oportuno mencionar que además del abastecimiento de agua potable a través de los manantiales en la RMZ, existen numerosos manantiales que son utilizados para actividades recreativas por medio de balnearios.

Considerando que las fuentes de abastecimiento de la RMZ se refieren al aprovechamiento de aguas subterráneas, es oportuno mencionar que administrativamente corresponden al Acuífero Morelia-Queréndaro el cual representa la fuente subterránea más relevante, extendiéndose bajo la cabecera municipal de Zinapécuaro, donde la extracción mediante pozos es el método principal de suministro. La gestión del agua potable y alcantarillado en

esta cabecera, está a cargo del Organismo Operador de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (OOAPAS) municipal.

Por el contrario, las localidades periféricas de menor tamaño, dependen primordialmente de los manantiales, donde la administración hídrica es responsabilidad de comités locales de las comunidades. De acuerdo con información de CONAGUA (2021), generalmente las comunidades operan con infraestructura deficiente, ya sea para la captación, almacenamiento y distribución, así como en las acciones de potabilización del recurso. Este hecho significa, por un lado, una acción que se delega o un relativo abandono de CONAGUA a la total iniciativa y capacidad de las comunidades, y como consecuencia, no se tienen garantías de un correcto abastecimiento de agua.

Capítulo V. Justificación y objetivos



5.1. Justificación

En la región oriente de Michoacán, la ERC presenta un perfil epidemiológico atípico. Según reporta Corona-Chávez *et al.* (2022), la patología no se limita a la población adulta, sino que afecta significativamente a grupos jóvenes menores de 30 años e incluso a niños. Esta distribución demográfica sugiere que la enfermedad no está asociada a las enfermedades comunes (como la diabetes mellitus o la hipertensión arterial). Por esta razón, ha sido catalogada como Enfermedad Crónica Renal de Etiología no Determinada (ERCEND). El origen desconocido de la ERCEND se relaciona a múltiples factores, tales como la genética, pero las principales causas pueden ser atribuibles a la ingesta de aire o agua, es decir al medio ambiente (Corona-Chávez *et al.*, 2022).

En estudios recientes, Robinson-Fuentes *et al.* (2023) y Díaz de León *et al.* (2025), han confirmado y documentado una elevada incidencia y prevalencia de la ERCEND en la región oriente de Michoacán y por lo tanto en la RMZ. Se destaca también que este foco epidemiológico presenta una notable coincidencia geográfica con las laderas y vertientes de la cuenca de la Sierra de San Andrés y el CGLA (Robinson-Fuentes *et al.*, 2023), por lo tanto, se perfila como principal una línea de investigación de impacto ambiental.

Por otro lado, aunque las plantas geotérmicas han sido reconocidas como una industria energética ambientalmente “limpia”, revisiones de estudios a nivel mundial han demostrado que es en realidad común que, impliquen un impacto ambiental que puede variar de acuerdo con su capacidad tecnológica y deficiencias técnicas de operación (Birkle & Merkel, 2000;

Bayer *et al.*, 2013; Bošnjaković, 2019; Corona-Chávez, 2025). El impacto ambiental puede estar relacionado a pérdidas de emisión de gases y fluidos, así como al mal manejo de residuos tóxicos que pueden contaminar el agua superficial y acuíferos subterráneos a diversas profundidades.

Diversos estudios (Birkle y Merkel, 2000; Panduro *et al.*, 2014; Panduro, 2015; Corona-Chávez *et al.*, 2022) han documentado la presencia de manantiales con altas concentraciones de elementos potencialmente tóxicos, tales como As, Cd, B y Fe, en la región oriente de Michoacán y la RMZ, y se plantea que dichos niveles podrían estar vinculados con la alta prevalencia de ERCEND reportada en la zona (Robinson *et al.*, 2023).

Sin embargo, hasta el momento, la procedencia y el origen de una posible contaminación ambiental en la RMZ no han sido determinados y el problema ha sido escasamente estudiado.

5.2. Objetivo general

Determinar la calidad de agua de las principales fuentes de abastecimiento de agua de la RMZ y analizar las variaciones espacio-temporales de su composición química y su relación con los procesos hidrogeoquímicos.

5.3. Objetivos específicos

- Identificar y georreferenciar las principales fuentes de abastecimiento de agua (manantiales, pozos y ríos) destinadas al uso y consumo humano en la RMZ.
- Determinar las facies hidrogeoquímicas y su distribución espacial utilizando los diagramas de Piper y Stiff.
- Caracterizar las facies hidrogeoquímicas de las principales fuentes de abastecimiento de agua de la RMZ y evaluar su calidad para uso y consumo humano.
- Identificar las variaciones de los manantiales de consumo humano con la posición geográfica y geológica de la planta geotérmica.
- Analizar las relaciones espaciales y su relación con los principales procesos hidrogeoquímicos de la RMZ, con base en el marco geológico e hidrológico.
- Estimar los procesos de mezcla de agua meteórica, hidrotermal y geotérmica, y de ser el caso, presentar una posible relación con el potencial impacto geotérmico en la RMZ, con base en las relaciones geoquímicas e isotópicas.

Capítulo VI. Materiales y métodos

6.1. Investigación bibliográfica y cartográfica

Se efectuó una revisión de la literatura geológica, hidrológica e hidrogeoquímica de la RMZ. Esta revisión abarcó tanto la información oficial, como la cartografía y los informes técnicos generados por el Servicio Geológico Mexicano (SGM), así como artículos de investigación publicados en revistas científicas. Se procedió a identificar las principales fuentes de abastecimiento (*e.g.* manantiales y pozos) señaladas por la población y comunidades, así como la recopilación de las bases de datos hidrogeoquímicos y meteorológicos.

Se procesaron las bases de datos cartográficos escala 1:50 000 en formato digital, ya sea tipo ráster obtenidos del INEGI, correspondientes a las subcuencas que integran el área de estudio (claves: RH12Gb Lago de Cuitzeo, RH18Gc Tuxpan, RH12Ae Tarandacuao, RH12Af Cavichi, RH12Ad Solís y RH12Ba Solís-Salamanca). Por lo tanto, se procesó el material cartográfico correspondiente a las cartas con clave E14A14 (Zinapécuaro), E14A15 (Maravatío), E14A24 (Tzitzio) y E14A25 (Ciudad Hidalgo). A partir de estos insumos cartográficos, se generaron los Modelos Digitales de Elevación (MDE), el mapa de pendientes y el mapa altimétrico para su análisis espacial y para asistir el trazo de la red y patrones de drenaje de la RMZ. De forma complementaria, se recopilaron y analizaron los datos climatológicos de las estaciones meteorológicas disponibles en la CONAGUA.

6.2. Trabajo de campo

6.2.1. Criterios y selección de sitios de muestreo

Con base en la recopilación bibliográfica, pero, sobre todo, mediante el contacto directo y la colaboración con las comunidades locales, se procedió a la identificación y georreferenciación de los sitios de muestreo. Estos puntos incluyeron fuentes de agua subterránea y superficial (específicamente manantiales y pozos) destinadas al uso y consumo humano. Asimismo, se muestreo un río considerado representativo del proceso hidrológico superficial en la cuenca.

6.2.2. Preparación de material de muestreo

El protocolo de preparación para la campaña de muestreo se llevó a cabo de manera convencional para cualquier muestreo de calidad de agua (CONAGUA, 2021) e implicó varias fases que están descritas en detalle en el Anexo V:

- i) Preparación de reactivos y material para muestreo
- ii) Lavado de envases de colecta de agua

En cada punto de muestreo se tomaron las coordenadas, altura del sitio, describiendo las características principales de relieve (morfología) e hidrológicas (drenaje natural). Se procedió a describir el tipo de abastecimiento de agua: manantial, pozo y río, con base en las descripciones del manual de CONAGUA (2015). Cuando fue posible, se llevó a cabo el aforo (volumen o caudal). Una vez que se describió el sitio se procedió a la medición de los parámetros fisicoquímicos con un equipo multiparamétrico marca HANNA modelo HI 98194, previamente calibrado en laboratorio y en campo (de ser necesario). Los parámetros que se midieron en campo fueron sólidos totales disueltos, pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, potencial redox, temperatura y salinidad.

Finalmente, se realizó la colecta de las muestras siguiendo la técnica convencional de enjuague, etiquetado, preservación con ácido nítrico ultra puro y, conservación a 4°C durante su traslado a los laboratorios analíticos.

Para el aforo se hizo midiendo el caudal o desfogue del manantial, en el caso del arroyo se tomó un perfil de fondo, dividiendo en pequeñas áreas transversales, y con ayuda de un flujómetro se obtuvo el valor para cada uno de los sitios, para mayor detalle ver el Anexo V.

6.3. Técnicas analíticas

Las muestras fueron transportadas al Laboratorio Nacional de Geoquímica de la Universidad Nacional Autónoma de México, en el Instituto de Geofísica y el Instituto de Geología.

6.3.1. Determinación de aniones

La cuantificación de aniones se llevó a cabo mediante la técnica de cromatografía iónica con detección conductimétrica (IC), por medio de un equipo de cromatografía de líquidos (Marca Waters) que consta de dos bombas binarias (Modelo 1525), un auto-muestreador (Modelo 717 plus) y un detector de conductividad (Modelo 432) (LANGEM, 2025).

Como fase estacionaria, se utilizó una columna IC-Pak Anion HR (Waters®), la cual posee un empaque de partículas de 5 μm con grupos funcionales de tipo amino. Se trabajó en modo isocrático con una fase móvil compuesta por una mezcla de acetonitrilo, butanol y una solución acuosa de gluconato/borato de sodio, operando a un flujo de 1.0 ml/min. El volumen de inyección fue de 10 μl y el tiempo de corrida analítica fue de aproximadamente 15 minutos. Los aniones analizados fueron: Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- y HCO_3^- .

6.3.2. Determinación de cationes

Para la determinación de cationes, se empleó la misma técnica y el mismo equipo que se usó para determinar los aniones, pero en este caso se realizó con una configuración, la fase estacionaria utilizada fue una columna C6 (Metrohm®), con un empaque de partículas de 5 μm . La operación se realizó en modo isocrático, utilizando una fase móvil acuosa que consistía en una mezcla de ácido dipicolínico (1.7 mM) y ácido nítrico (1.7 mM). El flujo se ajustó a 0.9 ml/min. Se inyectaron 10 μl de muestra, requiriendo un tiempo de corrida analítica de aproximadamente 55 minutos. Los cationes analizados fueron: Na^+ , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} (LANGEM, 2025).

6.3.3. Determinación de elementos traza

La determinación de elementos traza, metales pesados, metaloides y lantánidos se llevó a cabo utilizando la técnica de espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS). Se utilizó un equipo modelo iCAP QR de la marca *Thermo Scientific*. Previo al análisis de las muestras, el instrumento fue optimizado utilizando una solución acuosa certificada (*High Purity Standards*). Esta solución de sintonización contenía los elementos

seleccionados para cubrir un amplio intervalo de masas (específicamente Li, Co, In, Ba, Bi, Ce y U, a una concentración de 1 $\mu\text{g L}^{-1}$ cada uno). Para la cuantificación de los elementos traza, se generó una curva de calibración de 13 puntos (0, 0.5, 0.75, 1, 2.5, 5, 7.5, 10, 25, 50, 75, 100 y 250 $\mu\text{g L}^{-1}$). Esta curva se preparó mediante diluciones seriadas a partir de soluciones patrón monoelementales certificadas (*High Purity Standards*), como las de Si, Cs, Hg y U (con una concentración de 100 mg L^{-1}).

6.3.4. Determinación de isótopos $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$

Para el análisis isotópico se empleó la técnica de espectrometría de masas de ionización térmica (TIMS). Las muestras fueron entregadas al Laboratorio Universitario de Geoquímica Isotópica (LUGIS) de la Universidad Nacional Autónoma de México. La instrumentación disponible para estos análisis incluía dos equipos principales. Para la medición de las diferentes masas se utilizaron dos espectrómetros: un espectrómetro Thermo-Scientific TRITON, el cual está equipado con nueve colectores Faraday y una plataforma independiente que alberga cinco multicontadores de iones y un espectrómetro de masas FINNIGAN MAT-262, equipado con ocho colectores y un multi-contador de iones. Ambos espectrómetros se utilizaron de manera rutinaria para la determinación de las relaciones isotópicas de elementos como Rb, Sr, Sm, Nd, U, Pb y otros isótopos pesados.

6.4. Proyección y caracterización de facies hidrogeoquímicas

Los datos obtenidos del laboratorio fueron revisados cuidadosamente, verificando previamente su validez mediante el cálculo de balance de carga (ver Anexo VI). Sucesivamente los datos fueron proyectados en diagramas binarios y ternarios para observar tendencias, diferencias y su relativa correlación con su distribución espacial. Una vez que se identificaron grupos, los datos fueron proyectados en los diagramas de Piper (1944) y Stiff (1951), con la finalidad de identificar las facies hidrogeoquímicas.

Posteriormente, los datos fueron proyectados en los diagramas de Giggenbach (1988) y Gibbs (1970) con la finalidad de complementar las observaciones de procedencia y primeros indicios de madurez y relaciones de interacción agua-roca.

Finalmente se construyeron los diagramas binarios para observar las variaciones de la relación $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (Capo *et al.*, 1998; Bentley, 2006), con la finalidad de identificar las

diferencias isotópicas entre los diferentes grupos de datos y las facies hidrogeoquímicas previamente identificadas.

6.5. Calidad del agua

Para evaluar de manera integral la aptitud del agua para uso y consumo humano, se procedió a la formulación y cálculo de un Índice de Calidad de Agua (ICA). Esta metodología permite condensar un amplio conjunto de variables fisicoquímicas en un único valor numérico, facilitando su interpretación y la comparación espacial (CONAGUA, 2020; Chidiac *et al.*, 2023).

La ponderación de los valores calculados para el ICA se fundamentó en los valores previamente analizados y referidos como Límites Máximos Permisibles (LMP) de la NOM-127-SSA1-2021, las guías de la Organización Mundial de la Salud (OMS 2011) y la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA 2015). En el Anexo III se presenta una tabla comparativa y armonizada de los valores de las diferentes normas consultadas.

El valor final del ICA se obtuvo mediante una fórmula de agregación, permitiendo clasificar cada muestra en categorías cualitativas (*e.g.* “Excelente”, “Buena calidad”, “No apta para consumo”) y así generar un diagnóstico robusto de la potabilidad del recurso (Varol *et al.*, 2021).

6.6. Integración e interpretación de datos

La interpretación de los resultados se llevó a cabo mediante el análisis de distribución espacial y la aplicación del coeficiente de correlación de Pearson, contrastando los hallazgos con bases de datos hidrogeoquímicos de estudios previos compilados para este estudio. Esta herramienta estadística (correlación de Pearson) permitió cuantificar la fuerza y la dirección de las relaciones lineales entre las variables fisicoquímicas y las concentraciones iónicas identificadas.

Para la discusión final, además de revisar y analizar las relaciones geológicas e hidrológicas de los datos y diagramas generados, con el objetivo de identificar la importancia de los procesos hidrogeoquímicos de interacción agua-roca y de mezcla de aguas y fluidos hidrotermales, se proyectaron los datos con los *end member* de agua geotérmica, agua de manantial termal y manantial sin influencia geotérmica, ya sea de muestras colectadas en este

estudio, como de datos publicados previamente, con la finalidad de identificar la influencia de cada proceso y su relación con los procesos de impacto ambiental relacionados con las pérdidas de emisión del CGLA.

Capítulo VII. Resultados



7.1. Trabajo de campo

La identificación de los sitios de muestreo se basó esencialmente en la información directa que se obtuvo a través de las comunidades, jefaturas de tenencia y del organismo operador de la Ciudad de Zinapécuaro (OOAPAS).

Se observó que, aunque muchos de los manantiales coincidieron con aquellos previamente consultados en las bases de datos de INEGI, resultó fundamental ser guiados por la propia comunidad para llegar a los sitios de muestreo. Los criterios para seleccionar las fuentes de abastecimiento consistieron en su volumen y en que su distribución abasteciera a la mayor cantidad de población.

Por otro lado, una vez que fueron seleccionados los sitios, se consultó el mapa hidrográfico y geológico con la finalidad de poder realizar una correcta contextualización de los sitios de muestreo.

En total se muestrearon 18 sitios de abastecimiento de agua (ver Figura 8): 12 manantiales, 5 pozos y se colectó también una muestra de agua de río, con la finalidad de identificar elementos de contaminación ambiental y para su comparación con los sitios de agua subterránea de la RMZ. Excepto para 5 muestras, los muestreos se realizaron en dos estaciones del año: estiaje y precipitación durante los meses de octubre y abril, para completar un total de 30 muestras.

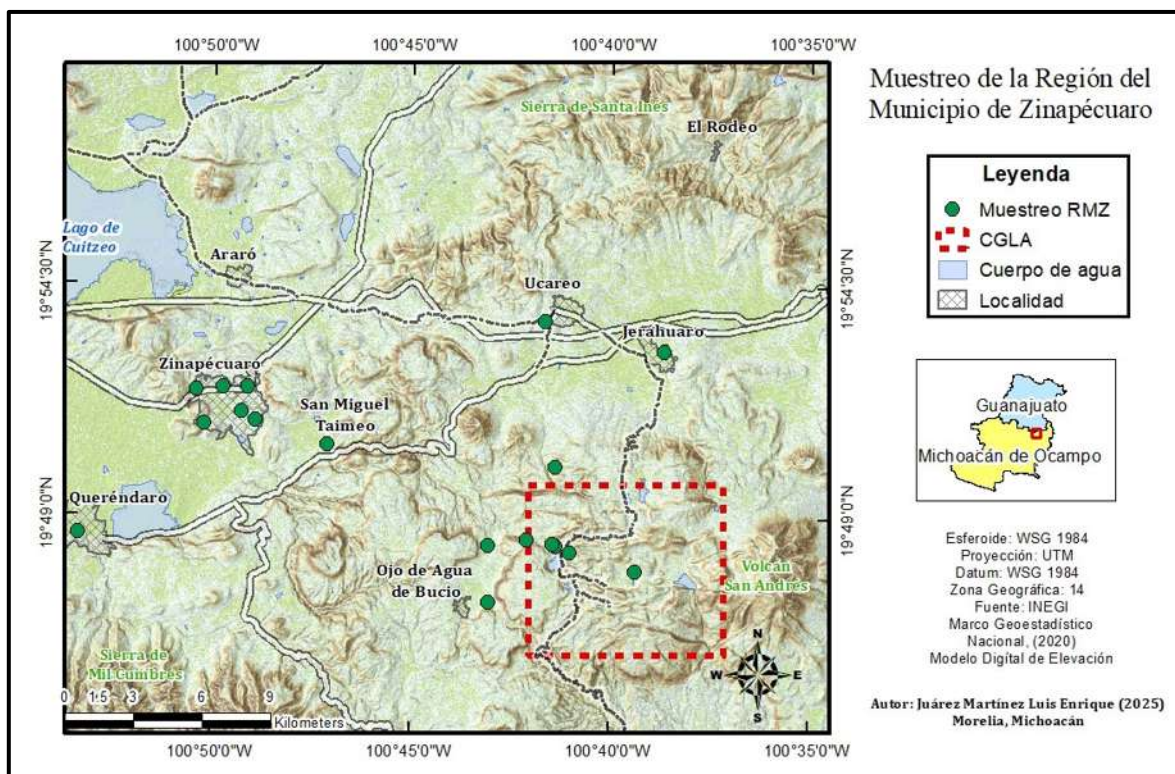


Figura 8. Mapa de distribución de muestras de los ríos, manantiales y pozos de la RMZ. Fuente: Elaboración propia

7.1.1. Descripción de manantiales

De los 12 sitios de muestreo de manantiales, 9 sitios presentan construcciones de protección denominadas aquí como cajas, mientras que 3 manantiales se presentan totalmente abiertos, sin algún tipo de obra. En todos los casos, ya sea con obra de caja o no, el agua de todos los manantiales está conectada por medio de mangueras de plástico, con una instalación artesanal, con uniones imperfectas que podrían derivar en pérdidas y en un alto riesgo de recibir contaminación atmosférica u orgánica.

7.1.1.1. Ojo de Agua de Bucio Los Veneros

Se ubica dentro de la localidad Ojo de Agua de Bucio, con coordenadas 19.7828° , -100.7172° y una altura de 2,576 m. s. n. m. Para acceder a la ubicación se parte de la plaza principal, yendo por las calles hacia el norte, donde inicia una brecha hacia el este, aproximadamente 1.5 km, en forma paralela al arroyo, donde se continúa caminando, a 30 m sobre el lecho del arroyo se ubican dos fuentes de abastecimiento conocidas por los comuneros como Los

Veneros. El manantial se encuentra sobre un río donde a pocos metros afloran flujos piroclásticos relacionados con los domos del sur del CGLA.

Es un manantial de caja (Figura 9c), con dimensiones de 1.5 m x 2 m aproximadamente, cuenta con una tapa de cemento para su mantenimiento y dos tuberías que salen de la caja, una conectada a una manguera que da hacia la localidad para suministrar y el otro tubo de desfogue para el exceso de agua. Se observa relativamente limpia la zona, sin embargo, al levantar la tapa, también se pudo observar el desarrollo de plantas acuáticas dentro del manantial. Nos hacen la observación que es el principal manantial de la comunidad y que incluso de ahí mismo se capta otra fuente de agua que se conduce a la tenencia de Ucareo.

En el aforo de este manantial se obtuvo un flujo de 7 L/s en temporada de precipitación y 0.5 l/s en temporada de estiaje.

7.1.1.2. La Yerbabuena El Catorce

Es un manantial relativamente abierto que se encuentra entre la localidad de Ojo de Agua de Bucio y sobre el camino pavimentado en cercanía con la localidad La Yerbabuena. Las coordenadas son 19.8054°, -100.7175° y una altura de 2,510 m s. n. m. Para llegar al manantial se sale de la localidad Ojo de Agua de Bucio hacia el oeste sobre carretera asfaltada y a la altura de un puente que pasa sobre un pequeño arroyo se llega con vehículo. A partir de ahí, se camina hacia el noroeste aproximadamente 200 m sobre una parcela con algunos árboles hasta llegar al cauce de un arroyo que tiene dirección norte-sur, donde se encuentra este manantial. El manantial se encuentra en el lecho del río sobre una cobertura de suelo de alrededor de 1 metro de espesor que se ha producido por la pedogenización de los domos de la Yerbabuena.

Es un manantial de caja de menos de un metro cuadrado, la cual se encontraba en muy malas condiciones, pues esta caja ya estaba casi por completo destruida. Sin embargo, se observa que tiene un flujo pequeño pero intermitente. Al manantial se conecta una tubería con una manguera para abastecer a la comunidad de la Yerbabuena.

En el aforo de este manantial obtuvo un flujo de 9 L/s en temporada de precipitación y 0.45 l/s en temporada de estiaje.

7.1.1.3. Ucareo Cañada Los Lobos I

El manantial pertenece a la Localidad de Ucareo, se ubica 500 m al noreste de Laguna Larga sobre la cañada del arroyo El Chino. Sus coordenadas son 19.8028°, -100.6834° y tiene una altura de 2,847 m s. n. m. Para acceder al manantial se viaja sobre la carretera que conecta a Jeráhuaro con el CGLA. El manantial está prácticamente a borde de carretera, sin embargo, se debe dejar el vehículo y bajar a la cañada El Chino que tiene un desnivel aproximado de 8 m. El manantial se ubica sobre el cauce de un río donde no aflora la roca *in situ*, pero se exponen numerosos bloques de riolitas de grandes dimensiones asociadas con sedimentos de granulometría variable.

Es un manantial de caja bien construido, con dimensiones de 2 m x 2 m aproximadamente como se observa en la Figura 9e. Tiene una tapa de metal de 50 cm x 50 cm, de él sale un tubo conectado a una manguera que abastece a la localidad. El muestreo se realizó colectando el agua con una cubeta directamente del depósito.

Se obtuvo un valor de 20 L/s en el aforo de ambas temporadas.

7.1.1.4. Ucareo Cañada Los Lobos II

Es un manantial pequeño de caja que se ubica al noroeste de Laguna Larga dentro el CGLA, que abastece a la localidad de Ucareo, con coordenadas 19.8053°, -100.6891° y una altura de 2,772 m s. n. m. Para llegar a su ubicación se accede por la terracería que conecta la Laguna Larga con el pueblo de la Yerbabuena (Taimeo Chico). Se toma una pequeña desviación del camino hacia el norte por una brecha secundaria por otros 200 m hasta llegar al lecho del arroyo Laguna Larga que drena hacia el sur. A partir de este entronque de la terracería y el arroyo se camina 100 m con dirección al este sobre la cañada atravesando la maleza hasta llegar al manantial. El manantial se encuentra sobre el lecho del río en coincidencia con la bifurcación de dos arroyos y en las paredes del cauce afloran flujos piroclásticos.

Es un manantial de caja de 40 cm x 60 cm, pequeño, pero bien construido, con una tapa de cemento. Se conecta una manguera que se orienta hacia el suroeste. A la altura del manantial y sobre el mismo arroyo se observan al menos tres mangueras que proceden del manantial Lobos I con dirección a la localidad de Ucareo.

Se obtuvo de aforo 0.27 y 0.36 L/s en temporada de precipitación y estiaje, respectivamente.

7.1.1.5. Ucareo Carricitos

Es un manantial que pertenece a la localidad de Ucareo y se ubica sobre la terracería que conecta la Laguna larga con el pueblo de la Yerbabuena (Taimeo Chico), aproximadamente a 2 km partiendo desde Laguna Larga. Sus coordenadas son 19.8077°, -100.7013° y una altura de 2,630 m s. n. m. El manantial está prácticamente a borde de la terracería, pero en un punto se accede a través de una vereda, donde se caminan 20 metros descendiendo hacia el norte sobre la maleza. El manantial se ubica al sur de Laguna Larga en una cañada estrecha donde prevalece la cobertura de suelo y de tipo forestal; se observan grandes espesores de suelos.

Es un manantial de caja con dimensiones de 60 cm x 50 cm, con tapa de cemento de las mismas medidas. Del manantial se conecta un tubo de manguera de plástico con dirección al suroeste que lleva el agua a la localidad de Ucareo.

Se obtuvo un valor de 0.24 L/s de aforo en la temporada de estiaje.

7.1.1.6. Ucareo Canoitas

Se ubica sobre la ladera oeste de la Sierra de San Andrés y al sureste de la localidad de Ucareo. Sus coordenadas son 19.8366°, -100.6897° y una altura de 2,640 m s. n. m. Para acceder se parte del crucero Cruz de Caminos que conecta Ucareo con la carretera Morelia – Maravatío. Se accede sobre una terracería hacia el sur que va relativamente paralela a la carretera, a través de múltiples campos de cultivos durante aproximadamente 10 km, hasta un punto que cambia de dirección al este por una terracería poco transitada y relativamente confusa para su acceso. Se dejan los vehículos en un punto y se ingresa a pie caminando por 100 m cortando maleza y se llega a un punto sobre un arroyo secundario hasta llegar al manantial. El manantial se ubica en la ladera oeste del CGLA donde prevalece la cobertura de suelo y forestal; se observan grandes espesores de suelos.

Es un manantial de caja de 4 m x 4 m, con una tapa de metal de 40 cm x 60 cm como se observa en la figura 9b. Está bien conservado y relativamente limpio. Se observa una tubería conectada con una manguera que se nos indicó que abastece a la localidad.

Debido a las dimensiones de este manantial y el difícil acceso a su interior no se pudo medir el flujo.



Figura 9. Fotos de los manantiales muestreados de la RMZ. Inciso a) Agua Fria, b) Canoitas, c) Los Veneros, d) Tico, e) Cañada Los Lobos y f) Jeráhuaro. Fuente: Propia

7.1.1.7. Ucareo Tico

El manantial se encuentra dentro de una localidad al sur del poblado de Ucareo, reconocida como Tico, que cuenta con una organización interna propia. Sus coordenadas 19.8946° , -100.6945° y una altura de 2,536 m s. n. m. Para llegar se parte del centro o plaza principal del poblado de Ucareo, por la calle Hidalgo por 4 cuadras hasta llegar a la Calle Nacional, se gira a la izquierda siguiendo por ese camino por 800 m hasta el entronque con la calle Lázaro

Cárdenas, de ahí se sigue por dos cuadras hasta llegar al manantial. El manantial se ubica en el poblado por lo que no se observa algún afloramiento o referencia geológica.

Desafortunadamente no pudimos muestrear el agua directa del manantial, dado que el terreno se encontraba cerrado. La muestra se colectó de un grifo que se encuentra en un espacio verde muy amplio frente al templo. Se observa un tanque semienterrado que hace función de manantial de caja de dimensiones de 5 m x 5 m. Se observa que tiene una puerta para ingresar al manantial y un desfogue que da a una canaleta para que el ganado pueda beber, además una tubería con una llave donde la gente va a suministrarse de agua como se puede observar en la Figura 9d.

Debido a que no se pudo acceder a la caja de este manantial, y la muestra fue tomada en una tubería controlada por un grifo, no se midió el flujo.

7.1.1.8. Jeráhuaro

Este manantial se ubica dentro poblado de Jeráhuaro y se nos comentó que es uno de los principales manantiales que abastece al pueblo. Sus coordenadas 19.8827°, -100.6444° y una altura de 2,478 m s. n. m. Para llegar desde la plaza principal se va hacia el oeste por la calle. Mariano Matamoros, luego al norte por la calle 16 de septiembre, se gira a la izquierda en la calle Álvaro Obregón y luego al norte por la calle Niños Héroes Norte; desde ahí a media cuadra o unos 50 metros está el manantial dentro de un predio que se encuentra bardeado. El manantial se ubica en el poblado por lo que no se observa algún afloramiento o referencia geológica.

Dentro del predio, el manantial se encuentra en una de las esquinas, con un aspecto de buen mantenimiento. Es un manantial de caja con dimensiones de 80 cm x 2 m y una tapa de cemento dividida en 3 partes como se observa en la Figura 9f. Las mangueras no se observan directamente y se indica que salen desde el manantial hacia el pueblo en forma subterránea para incorporarse a la red de distribución.

Se obtuvo un valor de 10 y 15 L/s de aforo en las temporadas de precipitación y estiaje, respectivamente.

7.1.1.9. Jeráhuaro Agua Fría

Se trata de un manantial abierto con un importante volumen que se encuentra dentro del CGLA y específicamente en la cercanía de la Subgerencia de Producción Termoeléctrica Occidente de Los Azufres. Tiene coordenadas de 19.7952°, -100.6559° y una altura de 2,880 m s. n. m. Para acceder se llega por carretera pavimentada que forma parte de la red de comunicación de la planta geotérmica, siguiendo el camino pavimentado hacia el este por 1.2 km, hasta llegar a la Unidad No. 18, de ahí sigue por una brecha en dirección al este por 500 m hasta llegar al manantial. Sin embargo, para acceder a él se tiene que atravesar por una pequeña escalera que pasa sobre un tubo de la CFE, y caminar 10 m. El manantial se localiza en las unidades basales del Cerro de San Andrés que representa el estratovolcán más alto de la zona y a pesar de no observar roca aflorante, las unidades pueden variar entre derrames de riolitas y flujos piroclásticos.

Es un manantial completamente abierto con dimensiones de 8 m x 1.5 m aproximadamente, cuenta con mucha vegetación a su alrededor y tiene un flujo alto y constante. Desde el nacimiento del agua se conectan al menos una decena de mangueras que abastecen a la población de Jeráhuaro, así como a distintas localidades (Figura 9a).

La importancia de este manantial es que representa el manantial más alto y al parecer se forma a partir de un sistema hidrológico que drena desde el Cerro San Andrés como se ha planteado por diversos autores (*e.g.* “Camp”, Birkle & Merkel, 2000). Este manantial representaría los valores hidrogeoquímicos de fondo sin influencia o contaminación del CGLA.

Con un aforo de 50 y 0.5 L/s en las temporadas de precipitación y estiaje, respectivamente.

7.1.1.10. Zinapécuaro Taimeo

Este manantial se encuentra dentro del Balneario San Miguel Taimeo, al suroeste de la ciudad y cabecera municipal de Zinapécuaro con coordenadas 19.8449°, -100.7852° y una altura de 2,033 m s. n. m. Se puede llegar al balneario por el propio pueblo San Miguel Taimeo accediendo por el cruce con la carretera Morelia – Maravatío y posteriormente sobre la calle Las Flores. También es posible acceder por una terracería que se ubica después del pueblo Santa Cruz por una desviación bien señalada donde se sigue hacia el oeste por 7 km.

El manantial se encuentra dentro del balneario en una construcción de tabique al fondo de las albercas, con un área bardeada sin aparentes accesos a las personas. El manantial se ubica en el poblado por lo que no se observa algún afloramiento, sin embargo, se observa que se encuentra en la base de una serie de conos cineríticos de composición andesítica.

Por ello, se considera un manantial abierto que se encuentra delimitado por una barda perimetral de ladrillos, bajo forma de tanque desde donde se conectan al menos seis mangueras que abastecen a la población de Zinapécuaro, así como al flujo de las albercas del balneario. A pesar de las puertas y delimitación perimetral, las condiciones del manantial se observan muy expuestas a contaminación microbiológica y atmosférica.

Por otro lado, es oportuno mencionar que el manantial de Taimeo representa el último manantial aguas abajo de la Sierra de san Andrés después del manantial (y balneario) Las Adjuntas y muy cerca del manantial (y balneario) las Orquídeas. El contacto de este manantial se refiere al contacto con el edificio volcánico basáltico El Colorado.

El aforo es de 18 L/s en la temporada de precipitación.

7.1.1.11. Zinapécuaro El Desierto

Se ubica dentro y al norte de la ciudad de Zinapécuaro, con coordenadas 19.8580°, -100.8216° y una altura de 1,901 m s. n. m. Aunque el nacimiento del manantial se encuentra hacia la cima, en este caso el organismo operador OOAPAS nos llevó a un tanque donde se concentra el agua y la gente se abastece directamente desde un grifo, mientras que el agua que no es aprovechada se vierte directamente a una coladera. El tanque se ubica a 100 m al oeste del antiguo acueducto sobre la calle Gral. Fco. J. Mujica esquina con Prof. Jesús Romero Flores. Es un manantial de caja de aproximadamente 2 m x 2 m. El manantial se ubica en el poblado por lo que no se observa algún afloramiento o referencia geológica.

Se obtuvo un aforo con un valor de 0.098 L/s en temporada de estiaje.

7.1.1.12. Zinapécuaro Atzimba

Este manantial se ubica dentro del Balneario Reino de Atzimba al noroeste de la ciudad de Zinapécuaro, con coordenadas de 19.8678°, -100.8417° y una altura de 1,892 m s. n. m. El manantial se encuentra delimitado por una construcción al interior del balneario.

Es un manantial abierto el cual se encuentra delimitado por malla ciclónica y una media barda construida con rocas, dentro del manantial se pueden observar la presencia de peces.

Al interior de las mismas instalaciones del balneario se ubica una planta purificadora de agua de la localidad, desde la cual llena sus garrafrones para la venta. De acuerdo con la narrativa de los ciudadanos con mucha probabilidad el agua no pasa a través de un proceso de purificación, por lo que ante la imposibilidad de muestrear directamente el manantial el muestreo se llevó a cabo en uno de estos garrafrones recién llenados.

Dado que no se pudo acceder al manantial no se cuenta con el aforo.

7.1.2. Descripción de los pozos de agua

Se colectaron muestras de 5 pozos de agua, cuatro de éstos se llevaron a cabo en la localidad de Zinapécuaro (Urano, Independencia, Francisco I. Madero y Tinajas), los cuales son administrados por el órgano operador OOAPAS. Otro pozo muestreado se localiza en el poblado de Queréndaro, al cual nos condujo también el órgano operador del ayuntamiento de Queréndaro. Todos los pozos se encuentran ubicados en las partes bajas de una serie de domos que circundan la ciudad de Zinapécuaro.

La infraestructura de los pozos es relativamente aceptable, sin embargo, es notorio que las casetas de cloración no son operativas, además, el mantenimiento se limita a abrir o cerrar el sistema, por lo que aparentemente no hay otro tipo de revisión o regulación, y mucho menos un control del agua que se extrae del subsuelo.

Por lo anterior, desafortunadamente no se pudo obtener información piezométrica ni aforo, pero de acuerdo con la narrativa de los operadores, el nivel superior de extracción de los pozos tendría profundidades que oscilan entre 80 y 120 m.

7.1.2.1. Zinapécuaro Tinajas

Este pozo se encuentra al noreste de la ciudad de Zinapécuaro, con coordenadas 19.8678°, -100.8187° y una altura de 1,925 m s. n. m. Para acceder se parte desde la plaza principal por la Carretera Federal 120 hacia Acámbaro, aproximadamente a 1.3 km.

El pozo se encuentra dentro de un predio bardeado. El pozo cuenta con una caseta de desinfección como se observa en la Figura 10c.

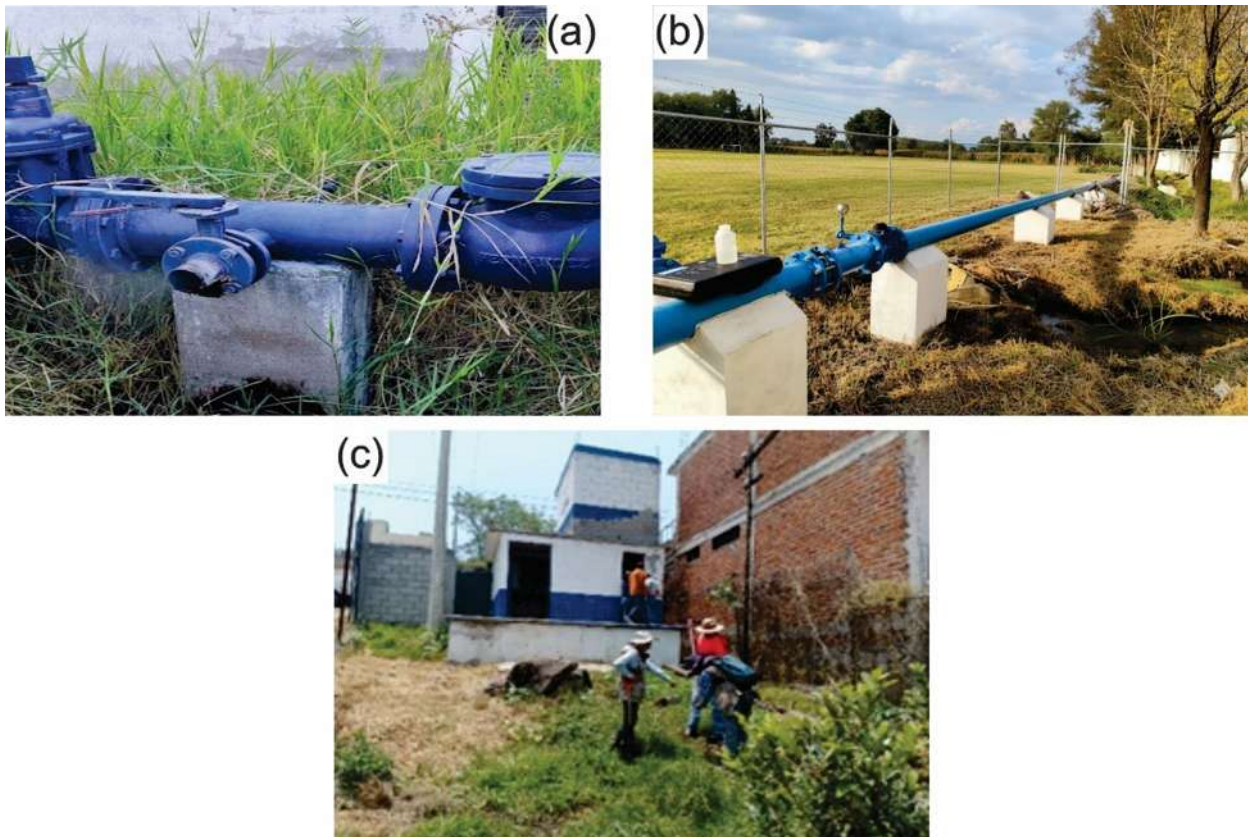


Figura 10. Pozos muestreados de la RMZ. a) Urano, b) Queréndaro y c) Tinajas. Fuente: Fotografías propias

7.1.2.2. Zinapécuaro Independencia

El pozo se ubica dentro y al norte de la ciudad de Zinapécuaro, con coordenadas 19.8675° , -100.8290° y una altura de 1,889 m s. n. m. Se llega desde la plaza principal desplazándose hacia el oeste por la Av. Hidalgo, 2 cuadras hasta la calle Ramón López Lara, de ahí al norte por 3 cuadras hasta la calle Colegio de San Nicolás.

El pozo se encuentra en un predio bardeado donde se ubica la construcción del pozo, que cuenta con una caseta, donde se lleva a cabo la desinfección y el control de la bomba.

7.1.2.3. Zinapécuaro Urano

Este pozo se encuentra también en la ciudad de Zinapécuaro, pero en la zona periurbana hacia el oeste, con coordenadas 19.8530° , -100.8371° y una altura de 1,881 m s. n. m. Para llegar a este pozo se parte desde la plaza principal hacia la carretera federal 120 hasta el entronque con la Carretera Morelia – Acámbaro, de ahí se gira al sur y se sigue por la calle del Panteón

por 2 cuadradas hasta la calle Soledad Herrera, se gira a la derecha y se sigue por 11 cuadradas hasta llegar a la Calle Juan Escutia y por 3 cuadradas hasta la calle Colegio Militar.

El pozo se encuentra en un predio bardeado, cuenta con una caseta donde se opera la bomba y la desinfección del agua, además de una válvula para liberar presión, como se muestra en la Figura 10a.

7.1.2.4. Zinapécuaro Francisco I. Madero

Este pozo se ubica al sureste de la ciudad de Zinapécuaro, con coordenadas 19.8529° , -100.8164° y una altura de 1,927 m s. n. m. Se llega partiendo desde el antiguo acueducto, se sigue la Calle Gral. Francisco J. Mujica por 5 cuadradas hasta la Calle 5 de febrero y se gira por 9 cuadradas hasta la calle Venustiano Carranza.

El pozo se encuentra en los límites urbanos de la ciudad y circulado con malla ciclónica en un área verde con árboles y juegos infantiles. Sin embargo, el pozo cuenta con una caseta de desinfección y control de bomba.

Se comentó que este pozo es el más reciente y recién construido por el Ayuntamiento y que contaría con estudios de geofísica, los cuales sin embargo no pudieron ser consultados.

7.1.2.5. Queréndaro

El pozo se encuentra al este de la localidad de Queréndaro, con coordenadas 19.8098° , -100.8877° y una altura de 1,834 m s. n. m. Para llegar se parte desde el Mercado Municipal, se sigue por la carretera federal Morelia – Maravatío convirtiéndose a calle 18 de marzo, hasta topar con la Unidad Deportiva. El pozo se localiza en la base de una serie de conos cineríticos de composición basáltica que se exponen al norte de la ciudad de Queréndaro.

El pozo se encuentra en la unidad deportiva, el cual está delimitado por malla ciclónica (Figura 10b). El pozo cuenta con una bomba que permanece siempre prendida, dado que es un pozo de tipo artesiano y así evitan pérdidas de este líquido vital. Este pozo también cuenta con una caseta de desinfección.

7.1.3. Descripción del agua de río Laguna Larga - Santa Teresa

El arroyo Laguna Larga se ubica en la zona inmediata baja de la presa conocida como Laguna Larga. Es un arroyo de suma importancia ya que representa la zona de inmediata descarga de

dicha presa, así como representaría también un punto posible de descarga por pérdidas de emisión de la planta geotérmica.

El punto de muestreo se ubica en la intersección del arroyo Lobos y El Chino, donde cambia de nombre a arroyo Laguna Larga, con coordenadas 19.8062° , -100.6906° y una altura de 2,749 m s. n. m. Para llegar a este arroyo se sigue la misma ruta que se llevó a cabo para el manantial Ucareo Arroyo Lobos II.

Es un arroyo que presenta bloques sedimentarios de diversas dimensiones desde centímetros hasta metros, de fragmentos de riolitas y, presenta en el borde del cauce un afloramiento de flujos piroclásticos de composición félsica con fragmentos líticos, obsidiana y minerales como cuarzo y feldespato. La muestra se colectó en la intersección de los dos arroyos y, por lo tanto, representaría una fuente compuesta.

En tiempo de estiaje se observa un decremento notable del flujo de agua en el arroyo y genera la precipitación de cristales lechosos de yeso sobre los fragmentos de cantos rodados, mostrando una composición con altas concentraciones de solutos.

En el aforo del arroyo se obtuvo el valor de 4 y 2.25 L/s en temporada de precipitación y estiaje, respectivamente.



Figura 11. Foto del Arroyo Laguna Larga donde se ubica el manantial de Cañada Los Lobos II y donde se colectó la muestra de agua de río. Fuente: Fotografía propia

7.1.4. Parámetros fisicoquímicos de campo

Además de la descripción de los sitios, previo a la colecta de las muestras se siguió la metodología descrita en el capítulo VI y en el Anexo V. Los parámetros fisicoquímicos obtenidos *in situ* se presentan en la Tabla 3.

Los datos obtenidos están graficados y comentados en el siguiente apartado, sin embargo, es importante hacer notar que para su manejo se asignaron claves que reflejan la localidad y la temporalidad, específicamente el mes de colecta, con la finalidad de comparar las variaciones de estacionalidad de la muestra. Por ejemplo, para la muestra “Taimeo o23”, el nombre señala el nombre del manantial, mientras que la sigla “o23” indica que la muestra ha sido colectada en octubre 2023, así como las claves con a24 se refieren a las muestras de la temporada de estiaje en abril de 2024.

7.2. Caracterización hidrogeoquímica

En este apartado se presenta la caracterización hidrogeoquímica de los sitios de abastecimiento de agua de la RMZ. La descripción se llevará a cabo en 4 etapas: i) el cálculo del balance iónico con la finalidad de valorar la calidad y consistencia de los análisis químicos; ii) la identificación de tendencias generales y grupos de datos relacionados con su relación espacial; iii) la proyección de datos en diagramas para identificar las facies hidrogeoquímicas; y, iv) la proyección de grupos de facies hidrogeoquímicas y su relación isotópica $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$.

7.2.1. Comprobación del balance iónico

En la Tabla 4 se presentan los resultados obtenidos por medio de la técnica de cromatografía iónica (CI). El balance de carga se calculó tomando en cuenta las concentraciones de los iones HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ obtenidos de la Tabla 4. El cálculo se realizó siguiendo el método de APHA, aplicado por ALS (2022), en el que la concentración de los iones se convierte en miliequivalente sobre litro (meq/L), en consecuencia, se toma en cuenta tanto su masa molar como su carga. Por otro lado, se asume que, aunque en teoría la suma de los iones positivos y negativos deberían neutralizarse, en el cálculo es común que otros cationes (*e.g.* Si, Mn, P, etc...), pueden inducir un error del cálculo, debido a que en sistemas específicos pueden tener concentraciones importantes, por lo que de acuerdo con al

Tabla 3. *Parámetros Fisicoquímicos obtenidos en campo*

Nombre	Clave	Tipo	X	Y	Altura (m)	Flujo (L/s)	T (°C)	pH	ORP (mV)	EC (µS/cm)	TDS (ppm)	Salinidad (PSU)
Los Veneros O23	LVo23	Manantial caja	19.7828	-100.7172	2576	7	14.3	5.95	108	96	48	0.04
Los Veneros A24	LVa24	Manantial caja	19.7828	-100.7172	2576	0.5	17.6	6.27	212	78	40	0.04
El Catorce O23	ECo23	Manantial caja	19.8054	-100.7175	2510	9	16.3	5.84	54.8	116	58	0.05
El Catorce A24	ECa24	Manantial caja	19.8054	-100.7175	2510	0.45	17.42	6.74	231.9	163	81	0.08
Taimeo O23	TMo23	Manantial abierto	19.8449	-100.7852	2033	18	29.3	6.67	118.9	299	155	0.15
Taimeo A24	TMa24	Manantial abierto	19.8449	-100.7852	2033	-	30.35	6.85	220	281	141	0.13
Tinajas 23	TJo23	Pozo	19.8678	-100.8187	1925	50	31.7	7.02	130.1	196	99	0.09
Tinajas A24	TJa24	Pozo	19.8678	-100.8187	1925	-	32.88	7.67	194.2	184	93	0.09
Independencia O23	IPo23	Pozo	19.8675	-100.8290	1889	-	27.6	8.48	142.2	175.1	87.3	0.39
Independencia A24	IPa24	Pozo	19.8675	-100.8290	1889	-	31.17	7.57	203	174	87	0.08
Urano O23	URo23	Pozo	19.8530	-100.8371	1881	-	25	7.2	115.5	525	262	0.25
Urano A24	URa24	Pozo	19.8530	-100.8371	1881	-	28.71	7.37	191.1	353	177	0.17
Francisco I Madero O23	FMo23	Pozo	19.8546	-100.8157	1942	-	12.02	8.22	117.1	274.4	136.3	0.5
Francisco I Madero A24	FMa24	Pozo	19.8546	-100.8157	1942	-	30.99	6.47	240.8	258	128	0.12
Cañada Lobos O23	CLo23	Manantial caja	19.8028	-100.6834	2847	20	25	6.63	180	300	146	0.145
Cañada Lobos A24	CLa24	Manantial caja	19.8028	-100.6834	2847	20	28.7	6.97	341.2	296	148	0.14
Cañada Lobos 2 O23	CL2o23	Manantial caja	19.8053	-100.6891	2772	0.27	15.7	6.37	132	236	120	0.11
Cañada Lobos 2 A24	CL2a24	Manantial caja	19.8053	-100.6891	2772	0.367	18.14	6.65	262.2	431	217	0.21
Arroyo L. Larga – Sta. Teresa O23	CAL2o23	Arroyo	19.8062	-100.6906	2749	4	15	3.7	73	1900	954	0.98
Arroyo L. Larga – Sta. Teresa A24	CAL2a24	Arroyo	19.8062	-100.6906	2749	2.25	25.18	3.62	178.2	1530	769	0.77
CanoitasO23	CNo23	Manantial caja	19.8366	-100.6897	2640	-	14.04	6.32	154.5	83	42	0.04
Jerahuario O23	JHo23	Manantial caja	19.8827	-100.6444	2478	10	17.6	6.3	69.5	240	120	0.11
Jerahuario A24	JHa24	Manantial caja	19.8827	-100.6444	2478	15	17.9	6.35	235.6	194	106.7	0.09
Agua Fría O23	AFo23	Manantial abierto	19.7952	-100.6559	2880	50	16.4	6.25	183.5	57	28	0.04
Agua Fría A24	AFa24	Manantial abierto	19.7952	-100.6559	2880	0.5	18.57	6.5	118.3	95	52.25	0.04
Carricitos A24	CRa24	Manantial caja	19.8077	-100.7013	2630	0.24	14.5	6	283.1	77	39	0.04
Queréndaro N24	QRo24	Pozo	19.8098	-100.8877	1834	40	25.91	7.19	219	200	98	0.09
Atzimba O23	AZo23	Manantial abierto	19.8678	-100.8418	1892	-	22.8	8.1	107.4	165.5	82	0.08
Desierto A24	EDa24	Manantial caja	19.8580	-100.8216	1901	0.098	23.66	6.32	310.3	375	188	0.18
Tico O24	TCo24	Manantial caja	19.8946	-100.6945	2536	-	17.2	6.5	251.7	175	103	0.1

algunos autores (Custodio & Llamas, 1983; Verma & Santoyo, 1997; Güler *et al.*, 2002) se asume que un error del ± 10 %, podría ser aceptable. Sin embargo, si en algunos casos se detectan elementos con concentraciones mayores al 0.1 wt%, el balance de carga puede ser reconsiderado.

En la Tabla 5 se presenta el valor del error en el cálculo del balance iónico de las muestras colectadas en los sitios de la RMZ. Con base en el cálculo (Anexo VI) se puede observar que solo dos muestras se encuentran por arriba del porcentaje de error aceptado: Cañada Los Lobos (CLa24; -42%), Tico (TCo24 -30.1%) y la muestra de Agua Fría (AFa24; 11.4%) ligeramente arriba del rango de error estándar. En consecuencia, se observa que más del 90% de las muestras son consistentes con el 10 % del margen de error y se puede asumir que los análisis de laboratorio son confiables.

Así mismo, considerando que todas las muestras han sido colectadas y analizadas con el mismo procedimiento metodológico, se sugiere que en el caso de las muestras aparentemente fuera de rango, es muy probable que existan iones que no estamos tomando en cuenta para el cálculo del balance de carga, tales como el boro, silicio, aluminio y el hierro, que por la naturaleza de las muestras podrían estar presentes.

7.2.2. Agrupación y tendencias de los manantiales de la RMZ

Una vez que los datos han sido validados se procede a revisar las variaciones de algunas propiedades fisicoquímicas representativas (T, pH), así como la concentración de los cationes y aniones.

En relación con la temperatura, se observa que todos los pozos presentaron temperaturas por arriba de los 25 °C, excepto uno en temporada de precipitación que es Fco. I. Madero (FMo23) con 12 °C, e incluso algunos rebasaron los 30 °C. El promedio fue de 22 °C, siendo la más baja de 12 °C del Pozo Fco. I. Madero (FMo23) y la más alta 33 °C de Pozo Tinajas (TJa24). Por su parte, los manantiales con altitud alta e intermedia presentan temperaturas por debajo de los 20 °C, mientras que los manantiales de cota baja presentan temperaturas por encima de los 20 °C.

En general, los pozos tienen un pH con tendencia a ser alcalinos y neutros, mientras que los

Tabla 4. Resultados de los análisis de aniones y cationes obtenidos por la técnica de cromatografía iónica (CI) de las muestras colectadas en los sitios de la RMZ. Se incluye el cálculo de miliequivalente sobre litro (meq/L) para cada componente. Las claves se asignaron con base al sitio y a la temporalidad del muestreo.

Sitio	No.	HCO ₃ ⁻		SO ₄ ²⁻		Cl ⁻		NO ₃ ⁻		Ca ⁺⁺		Mg ⁺⁺		Na ⁺		K ⁺	
		mg/L	meq/L	mg/L	meq/L	mg/L	meq/L	mg/L	meq/L	mg/L	meq/L	mg/L	meq/L	mg/L	meq/L	mg/L	meq/L
LVo23	1	48.13	0.79	5.41	0.11	3.58	0.10	1.24	0.02	3.67	0.18	1.24	0.10	10.08	0.44	4.29	0.14
LVa24	2	33.79	0.55	3.77	0.08	3.25	0.09	0.00	0.00	3.58	0.18	0.82	0.07	9.88	0.43	4.47	0.14
ECo23	3	29.79	0.49	15.21	0.32	8.48	0.24	1.65	0.03	4.57	0.23	1.51	0.12	11.33	0.49	6.01	0.19
ECa24	4	10.70	0.18	17.36	0.36	8.32	0.23	0.72	0.01	4.35	0.22	1.10	0.09	10.60	0.46	5.84	0.19
TMo23	5	146.62	2.40	19.63	0.41	2.48	0.07	2.00	0.03	11.99	0.60	8.41	0.69	31.09	1.35	7.62	0.25
TMa24	6	118.54	1.94	21.35	0.44	5.75	0.16	1.81	0.03	10.73	0.54	7.30	0.60	29.71	1.29	7.63	0.25
TJo23	7	88.34	1.45	2.48	0.05	4.54	0.13	2.33	0.04	5.83	0.29	4.64	0.38	24.31	1.06	3.42	0.11
TJa24	8	76.75	1.26	3.35	0.07	3.21	0.09	1.72	0.03	5.54	0.28	3.96	0.33	22.24	0.97	3.33	0.11
IPo23	9	93.90	1.54	3.67	0.08	3.31	0.09	3.05	0.05	6.83	0.34	5.97	0.49	22.43	0.98	3.94	0.13
IPa24	10	76.44	1.25	3.61	0.08	3.22	0.09	2.97	0.05	6.35	0.32	4.72	0.39	19.65	0.85	4.19	0.13
URo23	11	120.07	1.97	21.53	0.45	10.79	0.30	24.53	0.40	16.40	0.82	11.71	0.96	35.11	1.53	5.02	0.16
URa24	12	105.20	1.72	22.92	0.48	11.02	0.31	25.93	0.42	15.79	0.79	10.98	0.90	33.41	1.45	4.95	0.16
FMo23	13	95.81	1.57	26.08	0.54	13.97	0.39	13.54	0.22	12.41	0.62	7.17	0.59	32.14	1.40	8.64	0.28
FMa24	14	86.49	1.42	14.08	0.29	3.30	0.09	2.27	0.04	8.60	0.43	5.35	0.44	25.15	1.09	3.83	0.12
CLo23	15	22.44	0.37	48.86	1.02	1.14	0.03	2.28	0.04	3.37	0.17	0.84	0.07	14.68	0.64	18.30	0.59
CLa24	16	97.58	1.60	82.46	1.72	2.12	0.06	0.83	0.01	3.74	0.19	0.54	0.04	13.48	0.59	17.60	0.57
CL2o23	17	39.35	0.64	45.14	0.94	20.60	0.58	0.00	0.00	13.62	0.68	3.52	0.29	18.51	0.81	8.51	0.27
CL2a24	18	0.00	0.00	45.30	0.94	66.00	1.86	0.00	0.00	12.83	0.64	3.02	0.25	39.09	1.70	15.07	0.48
ACL2o23	19	0.00	0.00	36.84	0.77	482.38	13.61	0.00	0.00	23.79	1.19	4.39	0.36	253.99	11.05	67.27	2.16
ACL2a24	20	0.00	0.00	34.31	0.71	402.07	11.34	0.00	0.00	8.46	0.42	1.53	0.13	205.07	8.92	65.49	2.11
CNo23	21	46.46	0.76	1.95	0.04	2.12	0.06	1.94	0.03	6.71	0.33	2.18	0.18	6.57	0.29	2.34	0.08
JHo23	22	92.44	1.51	14.73	0.31	9.48	0.27	27.74	0.45	18.33	0.91	6.45	0.53	12.14	0.53	10.86	0.35
JHa24	23	50.81	0.83	10.81	0.23	7.65	0.22	26.71	0.43	15.28	0.76	5.02	0.41	11.14	0.48	9.20	0.30
AFo23	24	34.36	0.56	1.43	0.03	1.44	0.04	1.12	0.02	1.38	0.07	0.32	0.03	7.75	0.34	4.39	0.14
AFa24	25	20.78	0.34	1.46	0.03	0.87	0.02	0.90	0.01	1.50	0.07	0.00	0.00	7.02	0.31	4.21	0.14
CRa24	26	19.58	0.32	7.87	0.16	4.91	0.14	1.01	0.02	1.99	0.10	0.32	0.03	10.54	0.46	5.05	0.16
QRo24	27	103.61	1.70	8.91	0.19	3.04	0.09	1.08	0.02	7.27	0.36	8.04	0.66	20.43	0.89	2.71	0.09
AZo23	28	85.51	1.40	2.27	0.05	5.08	0.14	2.86	0.05	6.80	0.34	6.07	0.50	19.95	0.87	4.90	0.16
EDa24	29	47.73	0.78	42.88	0.89	27.97	0.79	24.95	0.40	10.56	0.53	6.22	0.51	31.96	1.39	29.06	0.93
TCo24	30	11.78	0.19	50.09	1.04	0.00	0.00	0.00	0.00	4.88	0.24	0.00	0.00	0.00	0.00	13.06	0.42

Tabla 5. Balance de Carga Iónico (BCI) de las muestras colectadas en los sitios de la RMZ.

Sitio	BCI	Sitio	BCI
LVo23	-8.5	CLa24	-42.0
LVa24	6.2	CL2o23	-2.8
ECa23	-1.5	CL2a24	4.6
ECa24	10.0	CAL2o23	1.3
TMo23	-0.4	CAL2a24	-2.0
TMa24	1.8	CNo23	-1.0
TJo23	5.0	JHo23	-4.4
TJa24	7.4	JHa24	6.9
IPo23	4.8	AFo23	-6.4
IPa24	7.2	AFa24	11.4
URo23	5.4	CRa24	7.7
URa24	6.0	QRo24	0.3
FMo23	2.8	AZo23	6.5
FMa24	6.3	EDa24	8.0
CLo23	0.4	TCa24	-30.1

manantiales y el arroyo tienen tendencia a un pH ácido, excepto por la muestra de Atzimba (AZo23) con un pH de 8.1. El pH promedio fue de 6.6, el más bajo fue de 3.6 para el Arroyo Los Lobos II (CAL2o23) y el pH más alto del muestreo pertenece al Pozo Independencia (IPo23) con 8.5.

Para analizar la tendencia de las concentraciones iónicas, se presentan los diagramas de barras agrupadas para cationes: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} y K^{+} (Figura 12) y para aniones: HCO_3^{-} , SO_4^{2-} , Cl^{-} , NO_3^{-} (Figura 13). En el eje x de las gráficas está el número de muestra a la cual pertenece ésta, de acuerdo con la Tabla 4, así como las concentraciones en meq/L normalizadas.

La concentración de los cationes de las muestras de agua de la RMZ muestra una tendencia a ser de tipo sódica, en cuanto el sodio es dominante con un promedio mínimo de 50%, seguido del calcio, con un promedio de al menos el 20%. Sin embargo, las muestras que presentan un comportamiento diferente son Cañada Los Lobos (CLo23), Jeráhuaro (JHo23, JHa24), Cañada Los Lobos (CL2o23II) y Canoitas (CNo23), las cuales presentan menos del 40% de sodio, y la muestra de Tico (TCa24) en la cual no se detectó contenido de sodio ni de magnesio, siendo el potasio el catión de mayor porcentaje (más del 70%). Resulta interesante notar que la tendencia espacial de los sitios de muestreo que presentan esta

diferencia, son los manantiales que por un lado son topográficamente más altos y en consecuencia muestran una relación más cercana con la planta geotérmica Los Azufres.

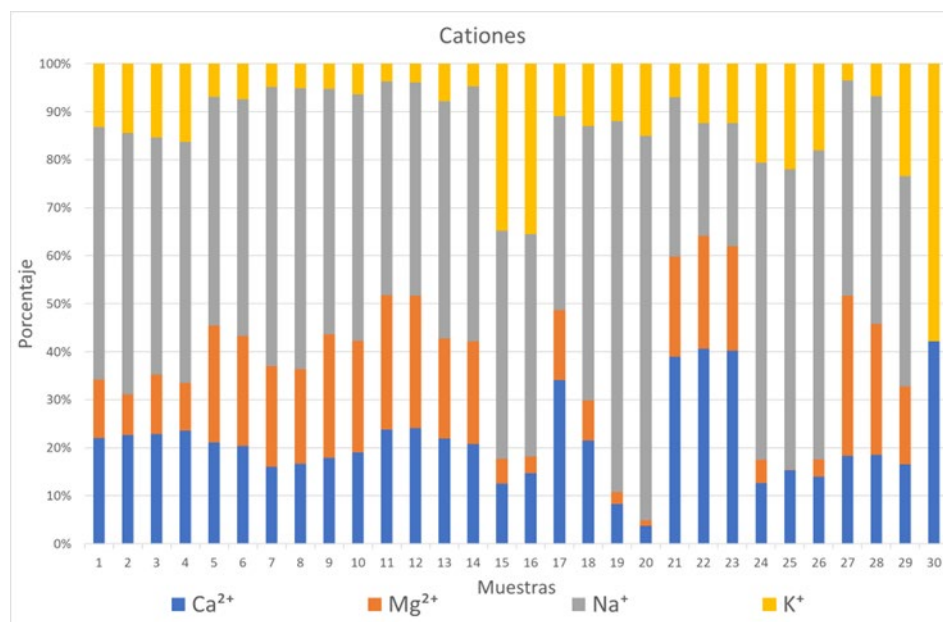


Figura 12. Diagrama de barras de Cationes de las muestras analizadas. Fuente: Propia.

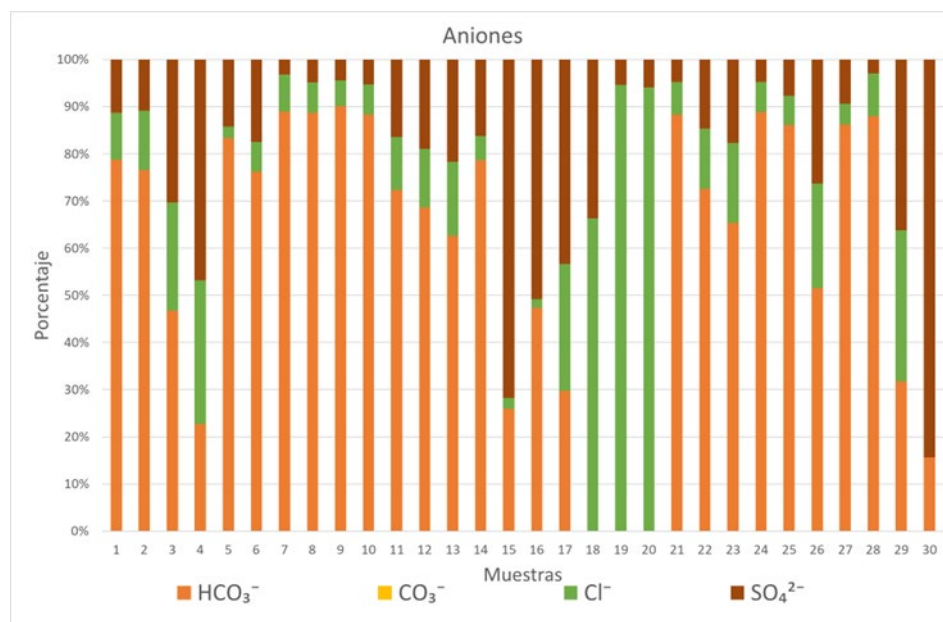


Figura 13. Diagrama de barras de Aniones de las muestras analizadas. Fuente: Propia.

Por su parte, en relación con el diagrama de aniones (Figura 13), se observa que casi todas las muestras tienden a ser aguas de tipo bicarbonatadas, a excepción de muestras como: El Catorce (ECa24), Tico (TCo24) y Cañada Los Lobos (CLo23). La mayor concentración del anión sulfato y de cloruros se presenta en las muestras como: Cañada Los Lobos II (CL2a24, ACL2o23) y Arroyo Cañada Los Lobos II (ACL2a24). Aunque la diferencia entre la tendencia geoquímica de aniones de las muestras es menor, nuevamente se observa que éstos manantiales coinciden con sitios relativamente altos topográficamente.

A partir de la revisión general y tendencias de los datos de aniones y cationes, así como en la consideración de identificar las variaciones de los manantiales de consumo humano con la posición geográfica y geológica de la planta geotérmica, la cual se ubica en la cima de la Sierra de San Andrés, los manantiales han sido agrupados con base en su altura topográfica: siete manantiales se consideran como altos >2,800 m s. n. m. (Los Veneros, El Catorce, Cañada Los Lobos I, Cañada Los Lobos II, Carricitos, Canoitas y Agua Fría), dos manantiales se consideran intermedios, con alturas entre 2,300 m s. n. m. y 2,800 m. s. n. m. (Jeráhuaro y Tico) y, tres son manantiales bajos <2,300 m s. n. m. (Desierto, Atzimba y Taimeo).

En la Figura 14 se presenta el diagrama binario conductividad eléctrica (CE) vs. sodio (mg/L). En este diagrama se presentan los datos agrupados con base a la altura topográfica de los sitios de muestreo de los manantiales. Es importante indicar que se han separado los grupos de muestras de manantiales con respecto a las muestras de los pozos, así como las muestras del arroyo Laguna Larga-Santa Teresa, por la diversidad de su naturaleza.

El diagrama ilustra una clara correlación lineal entre el ion de sodio y la conductividad eléctrica, señalando la importancia de su posición espacial en relación con el enriquecimiento de este catión. Como se puede observar, en este diagrama la conductividad eléctrica de las muestras varía alrededor de 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para la muestra del manantial de Agua Fría que, se considera el manantial más alto y con una relación más cercana a un origen meteórico (Birkle & Merkel, 2000). Este sitio, también muestra una baja concentración de sodio <10 mg/L; muy cerca de esta muestra se grafican manantiales altos como Canoitas, Carricitos, Los Veneros.

Por otro lado, en el mismo diagrama se observa un aumento y relativa transición entre 200 y 850 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para los manantiales intermedios y bajos (e.g. El Catorce), así como una

separación neta para las muestras del río Laguna Larga–Santa Teresa con valores de alrededor de 2,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Resumiendo, a partir del análisis preliminar de tendencias de los datos fisicoquímicos y de cationes y aniones y, en particular con la distribución de las muestras en el diagrama de la Figura 14, resulta evidente una relativa consistencia de la agrupación de las muestras relacionada con la cercanía a la cima de la Sierra de San Andrés y del CGLA. En acuerdo con otros autores (*e.g.* Birkle & Merkel, 2000), en adelante se considera que la muestra de Agua Fría representa el manantial más alto y fuera de la influencia del CGLA, y puede ser considerado un componente ideal o *end member*. Así mismo, la muestra con mayor influencia geotérmica, corresponde al sitio de agua del arroyo Laguna Larga–Santa Teresa. El resto de las muestras se proyectan de manera lineal, lo que indica que podrían considerarse como una mezcla entre ellas. Se propone continuar con el análisis de las facies hidrogeoquímicas, elementos traza e isotopía, basados en la agrupación de muestras en relación con la variación espacial de altura topográfica y señalando la relativa cercanía con el CGLA.

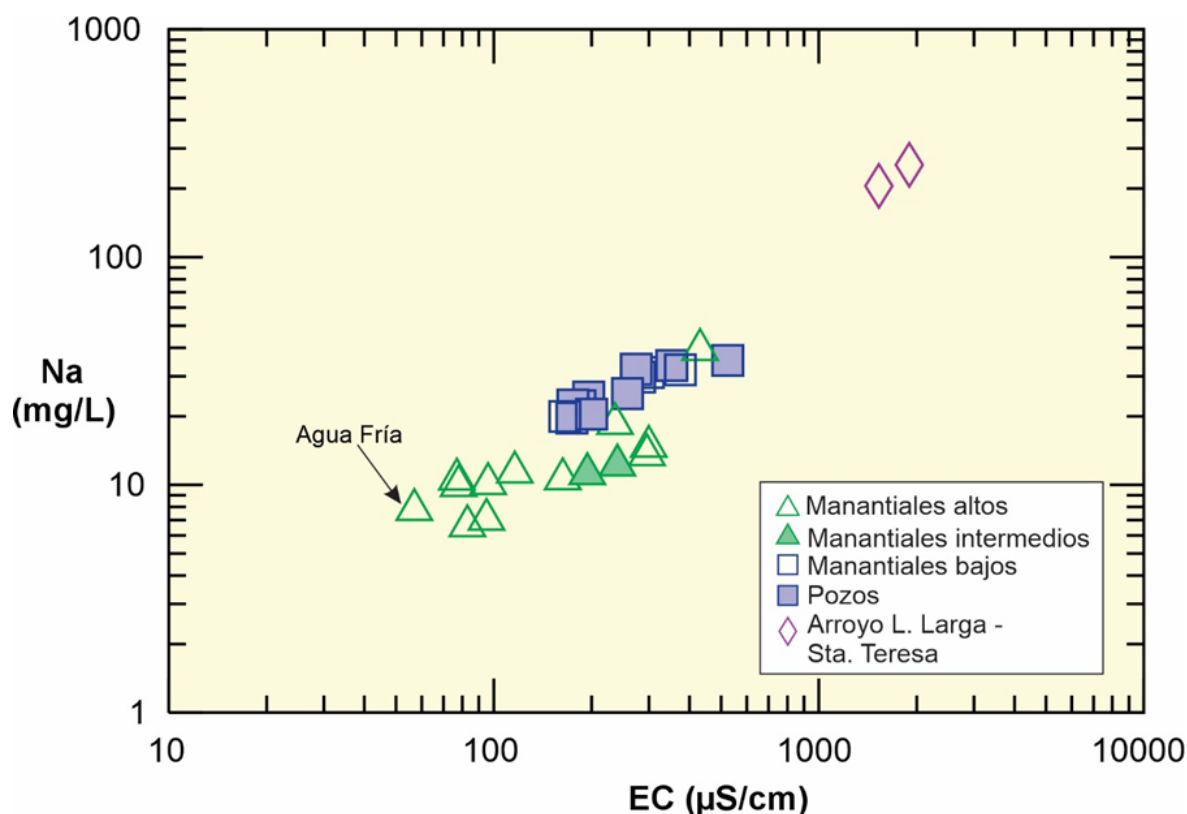


Figura 14. Diagrama de Conductividad Eléctrica (EC) vs concentración de sodio (Na^+) en mg/L.

7.2.3. Facies hidrogeoquímicas de la RMZ

Para identificar las facies hidrogeoquímicas de la RMZ se utiliza el Diagrama de Piper (1944) y para observar las variaciones espaciales el Diagrama de Stiff (1951).

7.2.3.1. Diagrama de Piper

En la Figura 15 y en la Tabla 6 se presentan las facies hidrogeoquímicas basados en el diagrama de Piper donde se han proyectado las muestras de la RMZ. Como ya se observaba en los diagramas de barras (Figuras 12 y 13), el 47% de las muestras se proyectan en el campo de las facies tipo bicarbonatadas sódicas; un 33% corresponden con facies hidrogeoquímicas tipo cloruradas/sulfatadas sódicas y un 20% de las muestras se grafican en el campo de las facies bicarbonatadas cálcicas/magnésicas.

Los manantiales altos, ya sean abiertos o de caja, tienen una dispersión amplia entre las facies hidrogeoquímicas del diagrama de Piper.

Los sitios de muestreo con una tendencia de agua tipo bicarbonatadas sódicas: Carricitos, Agua Fría y Los Veneros (CRa24, AFa24, AFo23, LVo23 y LVa24), en el campo de agua tipo clorurada/sulfatada sódica caen las muestras de ambas temporadas de: Cañada Los Lobos I y Cañada Los Lobos II (CL2a24, CL2o23, CLa24 y CLo23), las muestras de ambos manantiales tomadas durante la temporada de lluvias presentan una mayor concentración de cloruros. Canoitas (CNo23) es la única muestra que muestra ser de tipo bicarbonatada cálcica/magnésica.

Los manantiales intermedios se disponen con menor dispersión, pero también varían entre los campos de las facies 2 y 4 del diagrama de Piper: en el campo de aguas tipo bicarbonatada cálcica/magnésica se grafican las muestras de Jeráhuaro (JHo23 y JHa24) que pertenecen al mismo manantial, pero en diferente temporada, y en el campo de clorurada/sulfatada sódica cae la muestra de Tico (TCa24). Cabe mencionar que estas muestras son de dos localidades vecinas y se encuentran a una altura muy similar (2,523 y 2,478 m s. n. m, respectivamente). El manantial El Catorce se encuentra graficado en el campo de aguas tipo cloruradas/sulfatadas sódicas, sus muestras de ambas temporadas (ECo23 y ECa24) se separan una de la otra porque en la temporada de lluvia tiene más concentración de bicarbonatos, pero ambas caen en el mismo campo.

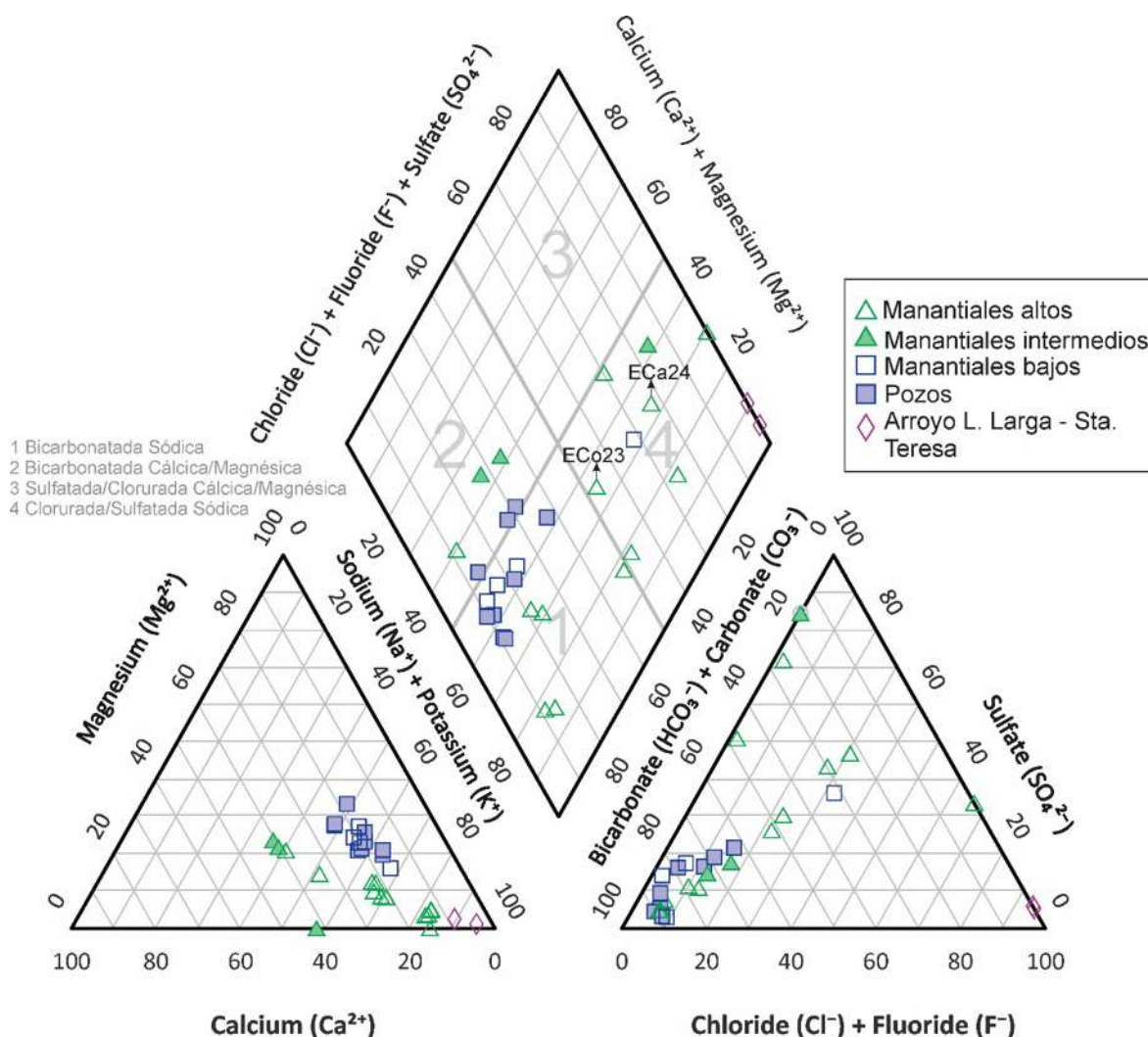


Figura 15. Diagrama Piper de las muestras de temporada de precipitación y estiaje, muestra las facies hidrogeoquímicas.

En relación con los manantiales bajos se observa que las muestras de Atzimba y Taimeo (AZo23, TMa24 y TMo23) corresponden a facies de tipo bicarbonatada sódica, mientras que la muestra de El Desierto (EDa24) se proyecta en el campo de agua tipo clorurada/sulfatada sódica sugiriendo un enriquecimiento relativo de cloruro en comparación de las demás muestras.

Por su parte, los pozos de Zinapécuaro no solo son considerados de alturas bajas, también corresponden a fuentes de abastecimiento de aguas subterráneas; se observa que casi todos se agrupan en el campo de aguas tipo bicarbonatadas sódicas. Sin embargo, el pozo Fco. I. Madero (FMo23 y FMa24) muestra un ligero aumento en el contenido de bicarbonatos en la temporada de lluvia. Los pozos de Queréndaro y Urano (QRo24, URo23 y URa24) muestran

una relativa similitud en cuanto se proyectan en el campo de las facies de aguas tipo bicarbonatadas cálcicas/magnésicas. Estos pozos se ubican en una altura de 1,834 y 1,881 m s. n. m. respectivamente y, representan las alturas más bajas entre los pozos muestreados.

Finalmente, como se esperaba, las muestras del arroyo Laguna Larga–Santa Teresa (ACL2o23 y ACL2a24) son las únicas muestras que corresponden a aguas altamente clorurada/sulfatada sódica y se grafican sobre el vértice del rombo, en la Tabla 7 se muestra una síntesis de la facie que presenta cada muestra.

7.2.4. Distribución espacial y variaciones de los diagramas de Stiff

7.2.4.1. Manantiales altos, intermedios y bajos

En las Figuras 16 a 18 se presentan los diagramas Stiff (1951). Como se puede observar en la Figura 16, en los manantiales altos no se identifica una sola tendencia y se observa una gran variedad de patrones topológicos en los diagramas de Stiff.

Sin embargo, el sodio es el catión dominante, mientras que el anión bicarbonato predomina en 5 manantiales: Los Veneros, El Catorce, Canoitas, Agua Fría y Carricitos (LVo23, LVa24, ECo23, CNo23, AFo23, AFa24 y CRa24); en cuatro sitios predomina el anión sulfato: Cañada Los Lobos, El Catorce y Cañada Los Lobos II (CLo23, CLa24, ECa24 y CL2o23) y; en una muestra de Cañada Los Lobos II (CL2a24) se caracteriza por el anión cloruro.

En relación con los manantiales intermedios (Figura 17), las 2 muestras de Jeráhuaro (JHo23 y JHa24) son dominadas por el anión bicarbonato y el catión calcio, mientras que para la muestra de Tico (TCo24) el catión que la domina es el sodio y el anión dominante es el sulfato. En los manantiales bajos (Figura 18) se observa que los sitios de los manantiales Taimeo y Atzimba (TMo23, TMa24 y AZo23) presentan un patrón similar de punta de flecha, donde el bicarbonato es el anión dominante y el sodio es el catión que domina, mientras que la muestra de El Desierto (EDa24) presenta un patrón totalmente diferente donde el sodio es el catión que domina, mientras que en los aniones son el cloruro y el sulfato.

7.2.4.2. Pozos

En los diagramas de los pozos (Figura 19) se puede observar que todos tienen el mismo patrón de punta de flecha, donde están dominados por el anión bicarbonato y el sodio como el catión de mayor concentración.

Tabla 6. Síntesis de las facies hidrogeoquímicas que presentan las muestras.

Arroyo	
ACL2o23	clorurada/sulfatada sódica
ACL2a24	clorurada/sulfatada sódica
Manantial Alto	
LVo23	bicarbonatada sódica
LVa24	bicarbonatada sódica
ECo23	clorurada/sulfatada sódica
ECa24	clorurada/sulfatada sódica
CLo23	clorurada/sulfatada sódica
CLa24	clorurada/sulfatada sódica
CL2o23	clorurada/sulfatada sódica
CL2a24	clorurada/sulfatada sódica
CNo23	bicarbonatada cálcica/magnésica
AFo23	bicarbonatada sódica
AFa24	bicarbonatada sódica
CRa24	bicarbonatada sódica
Manantial Intermedio	
JHo23	bicarbonatada cálcica/magnésica
JHa24	bicarbonatada cálcica/magnésica
TCo24	clorurada/sulfatada sódica
Manantial Bajo	
TMo23	bicarbonatada sódica
TMa24	bicarbonatada sódica
AZo23	bicarbonatada sódica
EDa24	clorurada/sulfatada sódica
Pozo	
TJo23	bicarbonatada sódica
TJa24	bicarbonatada sódica
IPo23	bicarbonatada sódica
IPa24	bicarbonatada sódica
URo23	bicarbonatada cálcica/magnésica
URa24	bicarbonatada cálcica/magnésica
FMo23	bicarbonatada sódica
FMa24	bicarbonatada sódica
QRo24	bicarbonatada cálcica/magnésica

7.2.4.3. Arroyo Laguna Larga–Santa Teresa

Como se puede observar en los diagramas de la Figura 20, el arroyo Laguna Larga–Santa Teresa (ACL2o23 y ACL2a24) está dominado por las sales (sodio y cloruro) pero con picos muy exagerados por sus altas concentraciones. En comparación con los otros gráficos, para estos casos se utilizó una escala mayor para observar mejor la topología del diagrama, el cual presenta un patrón de tipo “embudo” característico de las salmueras.

Finalmente, en la Figura 21 se presenta un mapa en el que se muestra la distribución de los patrones de los diagramas de Stiff, con la finalidad de ilustrar las diferencias espaciales antes descritas. En color azul celeste se presentan los manantiales altos, en color naranja los manantiales intermedios, en color amarillo los manantiales bajos, en color azul marino los pozos y en color rojo el arroyo Laguna Larga–Sta. Teresa.

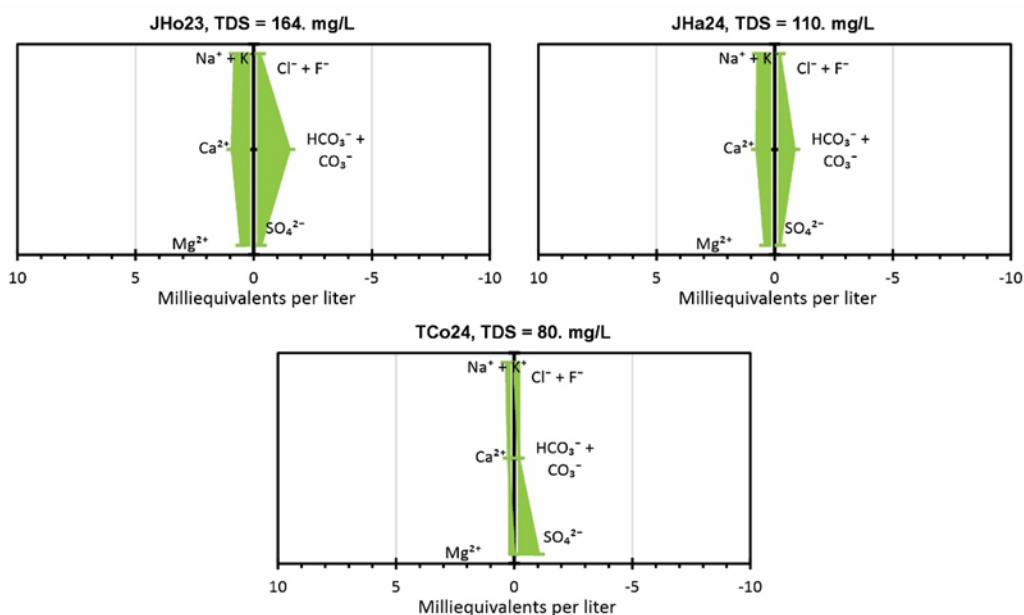


Figura 16. Diagramas de Stiff de los manantiales intermedios, en la parte superior tienen la clave de la muestra a la cual pertenecen. Fuente: Propia.

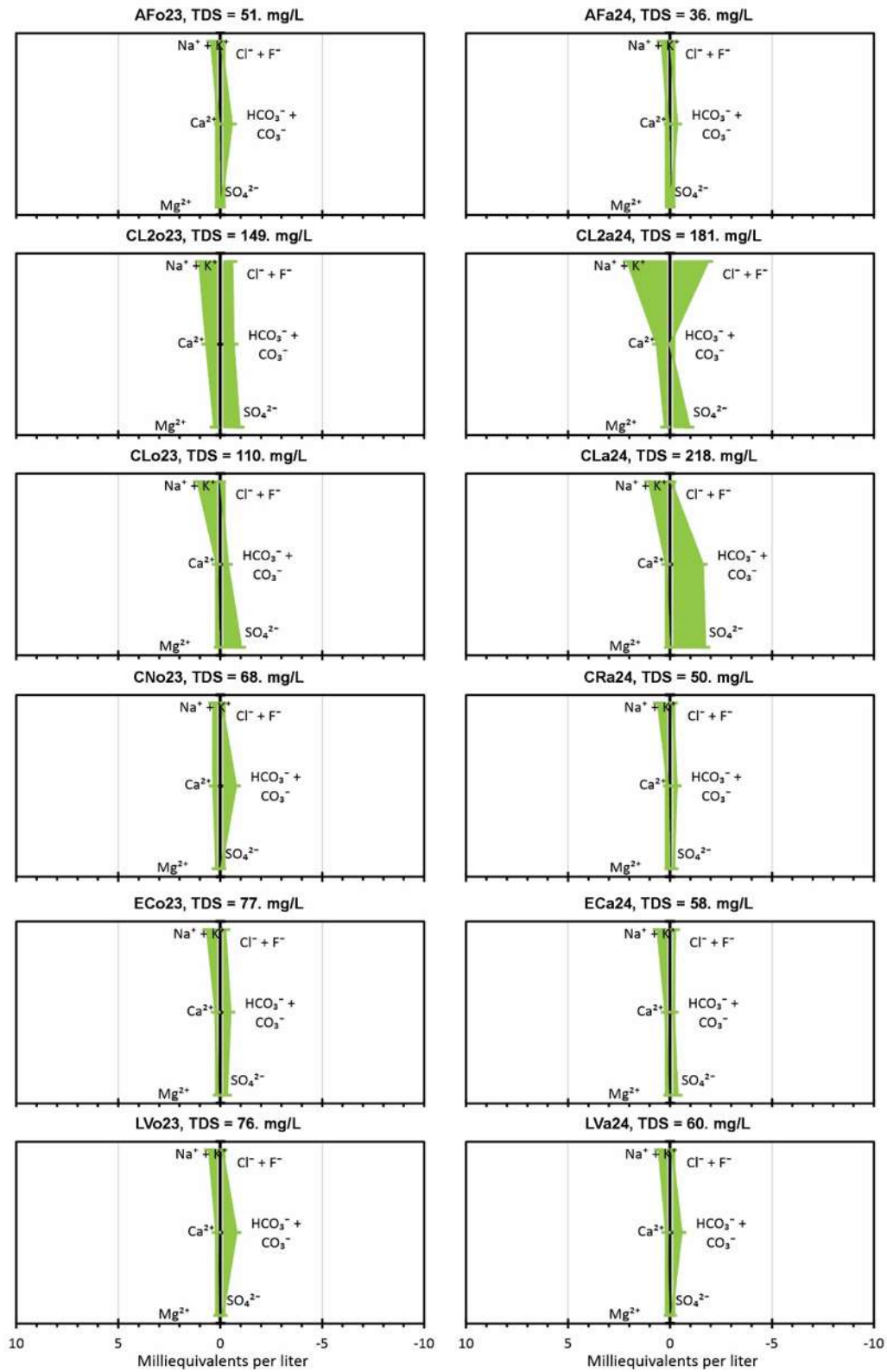


Figura 17. Diagramas de Stiff de los manantiales altos, en la parte superior tienen la clave de la muestra a la cual pertenecen. Fuente: Propia.

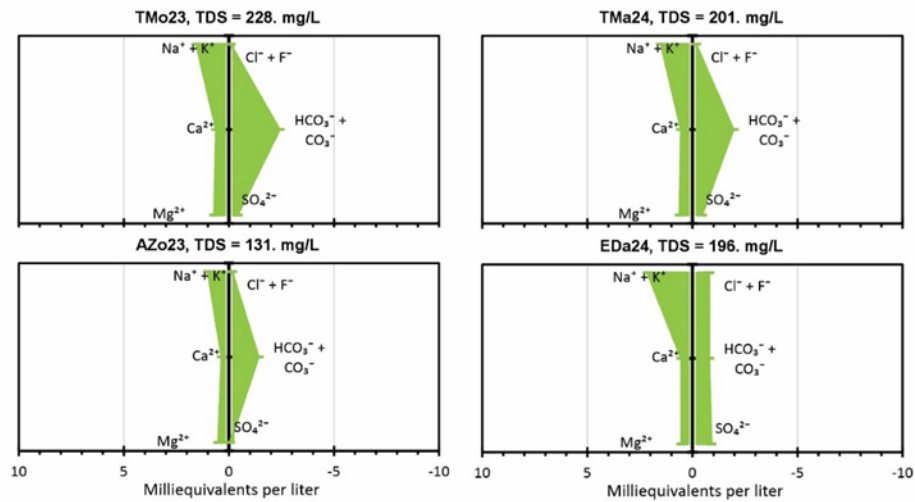


Figura 18. Diagramas de Stiff de los manantiales bajos, en la parte superior tienen la clave de la muestra a la cual pertenecen. Fuente: Propia.

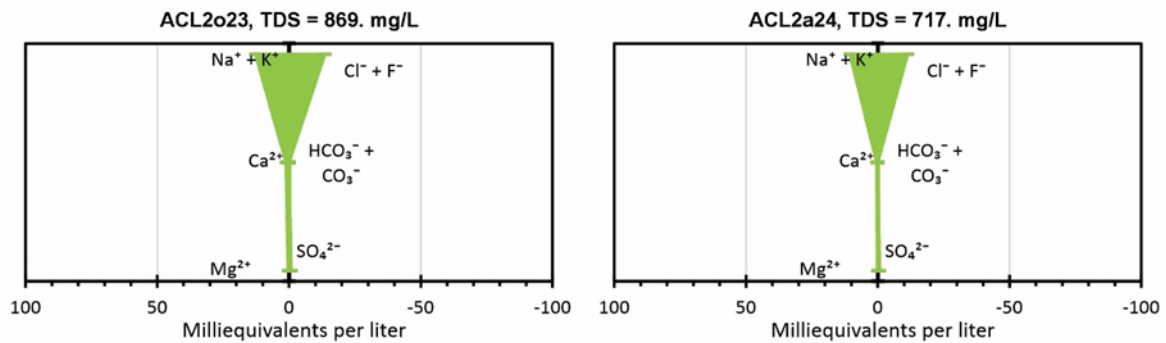


Figura 19. Diagramas de Stiff del Arroyo L. Larga–Sta. Teresa, temporada de precipitación (o23) y temporada de estiaje (a24). Fuente: Propia

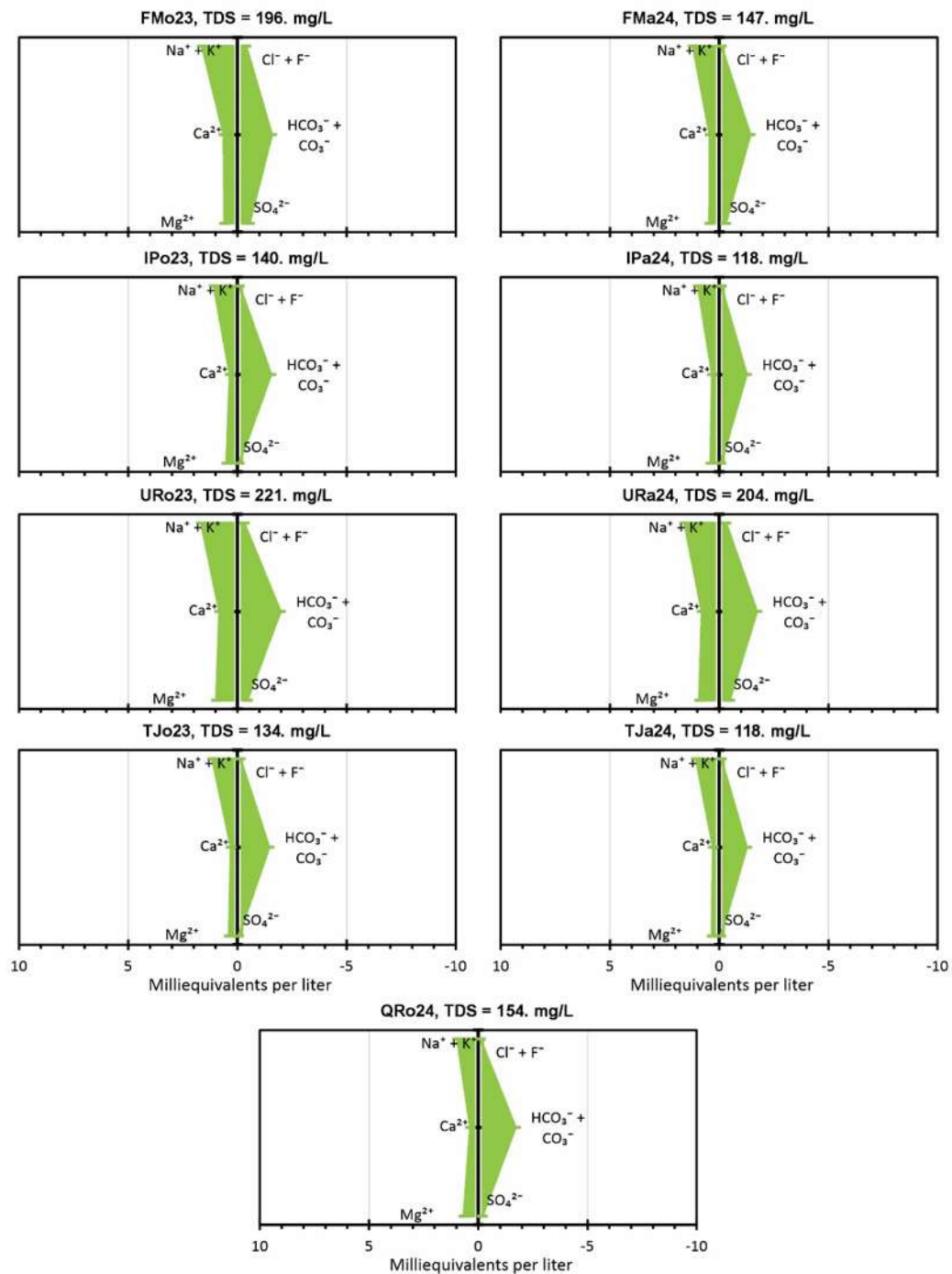


Figura 20. Diagramas de Stiff de pozos, en la parte superior tienen la clave de la muestra a la cual pertenecen. Fuente: Propia.

7.2.5. Relación isotópica $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$

Como uno de los principales trazadores se utilizó la relación isotópica de estroncio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) ya que es un excelente indicador de procedencia en las muestras de agua. Solamente se analizaron 10 muestras de los 30 sitios de fuentes de abastecimiento, considerando una relativa representatividad para cada grupo de datos en relación con la altura y la distancia hacia la potencial fuente del CGLA. Se obtuvieron datos de una muestra del arroyo Laguna Larga–Santa Teresa, 5 manantiales altos, un manantial intermedio, un manantial bajo y dos pozos.

En la Figura 22 se ha proyectado en el eje X el inverso de la concentración de estroncio ($1/\text{Sr}$ en mg/L), en el eje Y los valores de la relación isotópica de estroncio 87 sobre estroncio 86 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$). Se utiliza radio de $1/\text{Sr}$ como un arreglo matemático para comparar y alinear los resultados isotópicos, así como para destacar las relaciones de los *end member* y que las mezclas entre aguas se comporten como líneas rectas en lugar de curvas hiperbólicas como lo demuestran Jørgensen (2008) y Faure & Mensing (2005) en su estudio.

Se observa que los valores $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ oscilan entre 0.70397 y 0.70436, con valores entre 5 y $67 [\text{mg/L}]^{-1}$ de $1/\text{Sr}$. Sin embargo, es evidente un comportamiento relativamente heterogéneo entre las muestras de los diferentes grupos de manantiales: Agua Fría, Los Veneros, Cañada Los Lobos II, El Catorce y Canoitas (AFa24, LVo23, CL2o23, ECo23 y CNo23) muestran un rango de valores entre 0.70402 y 0.70436, el manantial bajo Taimeo (TMo23) un valor de 0.70397, el manantial intermedio Tico (JHa24) un valor de 0.70418 y el arroyo Cañada Los Lobos II (ACL2o23) un valor de 0.70415.

A pesar de esta dispersión, se observa que los valores mayores corresponden a los manantiales más cercanos al CGLA ubicados en las posiciones más elevadas. Con la finalidad de aprovechar más el comportamiento del elemento trazador de procesos hidrogeoquímicos, estas variaciones entre los valores isotópicos de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ y de $1/\text{Sr}$, serán discutidas más adelante, considerando el efecto de correlación con los valores de los pozos (agua geotérmica), aguas termales y, evaluar así los procesos hidrogeoquímicos de intercambio agua-roca con diferentes unidades geológicas.

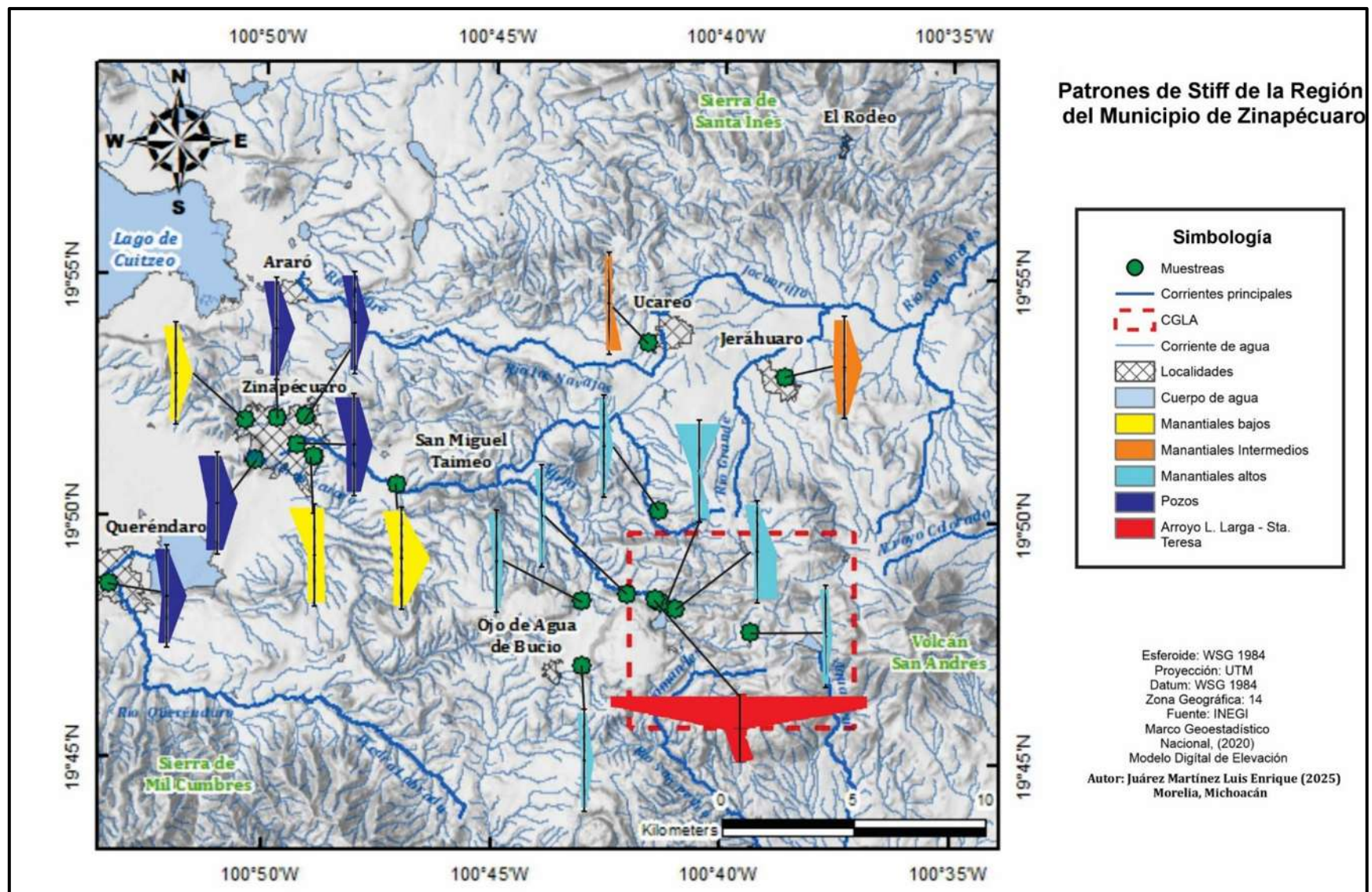


Figura 21. Mapa que muestra los patrones de los diagramas de Stiff de la RMZ. Fuente Propia

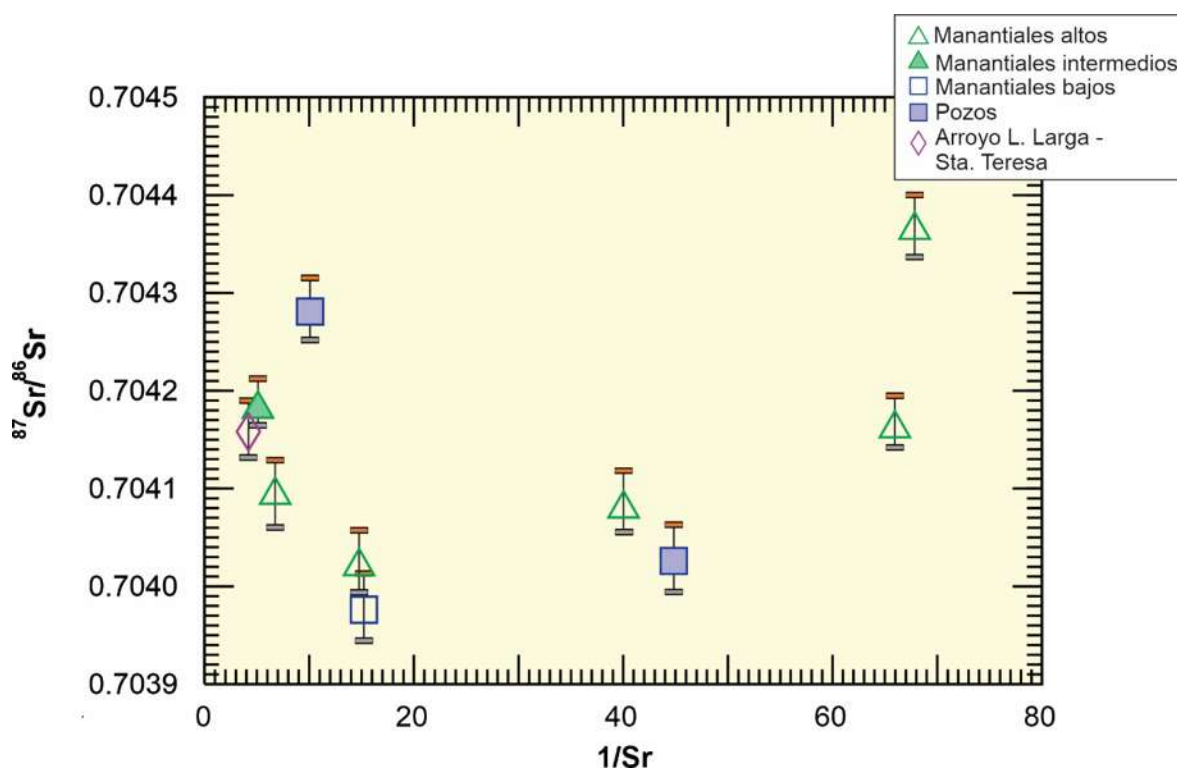


Figura 22. Diagrama de concentración de $1/Sr$ en $[mg/L]^{-1}$ vs relación isotópica $^{87}Sr/^{86}Sr$. Fuente Propia.

7.3. Calidad del agua de la RMZ

Para el análisis de calidad de agua de la RMZ solamente se utilizaron 28 de las 30 muestras, limitándose a las fuentes de abastecimiento de agua de las comunidades y excluyendo las muestras del sitio del arroyo Laguna Larga–Santa Teresa (ACL2o23 y ACL2a24) ya que, aunque es importante su composición para contextualizar los manantiales con el sistema hidrológico regional y eventualmente para su aprovechamiento para el riego de zonas agrícolas, esta no es una fuente de abastecimiento directa para la población. En este apartado se mantiene la agrupación de los datos de las fuentes de abastecimiento de agua: altos, intermedios, bajos y los pozos.

Se analizaron los valores de parámetros fisicoquímicos y dentro de ellos los Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) normados para agua de uso y consumo humano, ya sea por las NOM-127 (SSA, 2021) por la SEMARNAT, así como por normas internacionales por la Organización Mundial de la Salud (OMS 2011) y la Agencia Ambiental de Norteamérica (EPA, 2015). Posteriormente se realizaron los cálculos del Índice de Calidad de Agua (ICA;

Varol *et al.*, 2021) para concluir con un mapa regional que ilustra la calidad de agua de los manantiales de la RMZ.

7.3.1. Parámetros fisicoquímicos para evaluación de potabilidad del agua

En la Tabla 7 se presenta los promedios de los datos obtenidos para cada sitio de muestreo, con la finalidad de facilitar la comparación con los parámetros fisicoquímicos y elementos potencialmente tóxicos normados. En la Tabla 7 se pueden identificar en rojo, los valores que se acercan o sobrepasan el límite permisible de las diferentes normas (NOM-127, OMS 2011 y EPA US 2015) y, en verde cuando están debajo del límite, se utilizó la sílice porque las normas no consideran al silicio, pero la EPA 2015 si tiene LMP para la SiO₂.

La mayor parte de las muestras son manantiales, los cuales generalmente son fríos, y ligeramente van de ácidos a neutros, a excepción de Atzimba que es alcalino (pH de 8.1). Los pozos (Tinajas, Independencia, Urano, Madero, Queréndaro) tienden a ser más alcalinos y presentan temperaturas más altas a diferencia de los manantiales. Sin embargo, los manantiales Carricitos (6.0) y Ojo de Agua Bucio (6.1) están por debajo del límite inferior de las normas (6.5). Un agua ácida que tiende a aumentar la solubilidad de los EPT y genera afectaciones a los sistemas de la biósfera y pedósfera.

Los ríos que podrían verse afectados por estas muestras de agua en las que su pH cae por debajo del rango límite permisible de la norma son: la muestra del manantial Los Veneros (LVo23) que afecta al Río Ojo de Agua de Bucio, el cual aguas abajo se une al Río El Arenal y posteriormente al Río Piedra Labrada; el manantial El Catorce (ECo23) que aguas abajo se une al Río La Yerbabuena; los manantiales Carricitos y Cañada Los Lobos II (CRa24 y CL2o23) que se unen aguas abajo al Río Laguna Larga; el manantial Agua Fría (AFo23) que aguas abajo se une al Río Tejamaniles; el manantial Canoitas (CNo23) que podría afectar al Río Agrio y; el manantial de Jeráhuaro (JHa24) que podría afectar al Río Grande.

7.3.2. Límites permisibles de elementos potencialmente tóxicos

Es crucial verificar los límites permisibles de los Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) en el agua porque estos contaminantes no son biodegradables, se acumulan en el organismo y pueden causar daños irreversibles a la salud incluso en dosis muy bajas. A continuación, se

Tabla 7. Valores promedio de los parámetros fisicoquímicos y concentraciones de elementos potencialmente tóxicos obtenidos de la tabla del Anexo VII donde se presentan todos los valores y concentraciones obtenidas, así como el cálculo del promedio (Avg) y desviación estándar (stdDev). En este caso se colocan solo los valores promedio con la finalidad de compararlos con los normados (en la base) a nivel nacional e internacional. Los valores cerca del límite permisible en naranja, en rojo cuando coinciden o superan los límites permisibles y en verde los valores por debajo de los límites permisibles. Los guiones indican que los valores están por debajo del valor de detección y los valores que se muestran como 0.000 tienen un valor redondeado por el umbral de visualización que es a partir de la cuarta decimal.

Muestra	Tipo	T	pH	ORP	EC	TDS	HCO3-	SO4 ²⁻	Cl-	Al	SiO2*	As	Pb	B	Sr
		(°C)		(mV)	(μS/cm)	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Ojo de Agua Bucio_avg	Manantial Caja	16.0	6.11	160.00	87.000	44.00	40.96	4.59	3.42	0.000	135.09	0.004	0.000	0.167	0.02
El Catorce_avg	Manantial abierto	16.9	6.29	143.35	139.50	69.50	20.24	16.29	8.40	0.001	142.08	0.003	0.000	0.639	0.03
Taimeo_avg	Manantial Caja	29.8	6.76	169.45	290.00	148.00	132.58	20.49	4.12	0.007	199.12	0.038	0.000	0.593	0.07
Tinajas_avg	Pozo	32.3	7.35	162.15	190.00	96.00	82.55	2.91	3.87	0.001	177.16	0.017	0.000	0.153	0.03
Independencia_avg	Pozo	29.4	8.03	172.60	174.55	87.15	85.17	3.64	3.27	0.000	172.19	0.016	0.000	0.145	0.04
Urano_avg	Pozo	26.9	7.29	153.30	439.00	219.50	112.64	22.23	10.91		190.03	0.007	0.000	0.385	0.13
Madero_avg	Pozo	21.5	7.35	178.95	266.20	132.15	91.15	20.08	8.64	0.040	163.43	0.010	0.001	0.609	0.08
Lobos I_avg	Manantial Caja	26.9	6.80	260.60	298.00	147.00	60.01	65.66	1.63	1.532	260.63	0.001	0.002	2.318	0.01
Lobos II_avg	Manantial abierto	16.9	6.51	197.10	333.50	168.50	—	45.22	43.30	0.034	153.52	0.064	0.000	8.102	0.17
Jerahuario_avg	Manantial Caja	17.8	6.33	152.55	217.00	113.35	71.62	12.77	8.56	0.178	134.99	0.001	0.000	0.244	0.18
AguaFria_avg	Manantial abierto	17.5	6.38	150.90	76.00	40.13	27.57	1.45	1.16	0.016	107.61	0.001	0.000	0.048	0.01
Carricitos_A24	Manantial Caja	14.5	6.00	283.10	77.00	39.00	19.58	7.87	4.91	0.002	123.89	0.001	—	0.827	0.02
Queréndaro_N24	Pozo	25.9	7.19	219.00	200.00	98.00	103.61	8.91	3.04	—	75.94	0.017	—	0.380	0.04
Desierto_A24	Manantial Caja	23.7	6.32	310.30	375.00	188.00	47.73	42.88	27.97	0.009	127.28	0.003	—	2.998	0.15
Tico_N24	Manantial Caja	17.2	6.50	251.70	175.00	103.00	11.78	50.09	—	0.016	88.30	0.000	—	0.144	0.16
Canoitas_N23	Manantial Caja	14.0	6.32	154.50	83.00	42.00	46.46	1.95	2.12	0.057	109.69	0.006	0.000	0.138	0.07
Atzimba_N23	Manantial Abierto	22.8	8.10	107.40	165.50	82.00	85.51	2.27	5.08	0.003	200.81	0.015	0.000	0.191	0.03
NOM-127-SSA1-2021			6.5-8.5					400		0.200		0.025	0.010		
OMS 2011				<200	<200	<1000		250	<250	0.200		0.010	0.010	0.300	<2
US EPA 2015			6.5-8.5	200-400		<600					210	0.010	0.015	0.300	

presenta el análisis de las concentraciones de As, B, Al, Fe y Si, elementos que fueron seleccionados debido, por un lado, a la recurrencia de los valores por arriba del LMP de las normas analizados en los manantiales de la RMZ y, por otro lado, porque otros elementos potencialmente tóxicos como el Pb, Hg, Cd, Cu, Cr, Ni, por el contrario, no se detectaron en concentraciones que representen un peligro para la población.

7.3.2.1. Límite permisible de arsénico

En la Figura 23 se puede observar que el análisis de los datos muestra una marcada diferencia en la calidad del agua según su origen y profundidad. Los pozos exhiben una tendencia sistemática a presentar niveles de arsénico más elevados, por el contrario, la mayoría de los manantiales de caja, como Agua Fría (0.001 mg/L) y Carricitos (0.001 mg/L), mantienen niveles significativamente bajos. Existe también una tendencia de zonificación crítica en áreas específicas como Taimeo y la zona de Lobos II, donde sus concentraciones se disparan.

Las muestras de pozo como de manantial (Urano y Canoitas) se acercan al límite de las normas (0.01 mg/L), siendo también un riesgo para la población que se abastece de estos cuerpos de agua. Hay 10 muestras que superan el límite permisible de 0.010 mg/L de la NOM-127-2021, OMS 2011 y EPA 2015 siendo: Taimeo, Cañada Los Lobos II, Tinajas, Independencia, Fco. I. Madero, Atzimba y Queréndaro (TMo23, TMa24, CL2a24, TJo23, TJa24, IPo23, IPa24, FMa24, AZo23 y QRo24). Un sitio supera la norma casi 13 veces (0.127 mg/L) corresponde a la muestra CL2a24. El gráfico tiene un acercamiento a las muestras para que se puedan apreciar de mejor manera, por lo que las muestras de Cañada Los Lobos 2 y Taimeo (TMo23, TMa24 y CL2a24) no muestran su barra completa.

El manantial Taimeo en ambas temporadas (TMo23, TMa24) reportó un alto contenido de este elemento (0.0371 y 0.0379 mg/L, respectivamente) y el manantial Cañada Los Lobos II que presenta la concentración más alta (0.127 mg/L) en la temporada de estiaje (CL2a24), en donde las localidades afectadas son Zinapécuaro y Ucareo, respectivamente.

Además de las 3 muestras de agua ya mencionadas, hay 3 pozos (Tinajas, Independencia y Fco. I. Madero): de las cuales 2 tienen una concentración que rebasa el LMP en ambas temporadas y uno en temporada de estiaje (TJo23, TJa24, IPo23, IPa24 y FMa24) y, un

manantial bajo Atzimba (AZo23), los cuales abastecen de agua a la localidad de Zinapécuaro y el pozo Queréndaro (QRo24) que abastece a la localidad de Queréndaro.

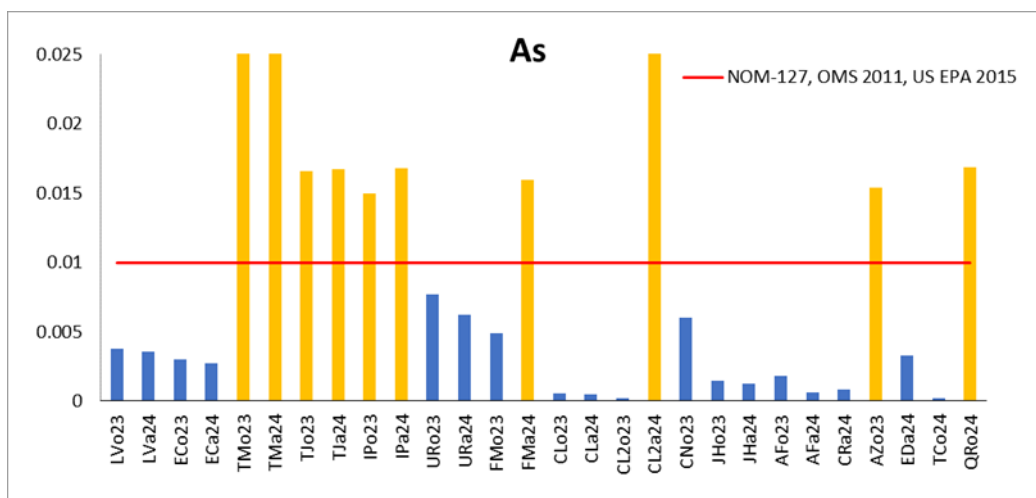


Figura 23. Diagrama de barras del As (mg/L) contra el Límite Máximo Permissible de las Normas NOM-127, OMS 2011 y US EPA 2015. En color amarillos las muestras que sobrepasan el LMP de las normas y en color azul las muestras que están por debajo del LMP.

Hay ríos que se podrían ver afectados por estos manantiales que sobrepasan la norma, como el caso del manantial Cañada Los Lobos II (CL2a24) que se une con el Río Laguna Larga, o el manantial Taimeo (TMo23) que se une a la corriente del Río Zinapécuaro.

7.3.2.2. Límite permisible de boro

En la Figura 24 se observa una tendencia de concentraciones elevadas de boro distribuidas en diversas fuentes de la región. Las zonas de Lobos, Taimeo y Desierto presentan los valores más críticos, independientemente de si se trata de manantiales o pozos. El B no se encuentra normado a nivel nacional, pero si por normas internacionales como la OMS 2011 y la EPA 2015 con un límite máximo permisible de 0.300 mg/L en ambas.

Con base en los resultados, el 50% de los sitios registran valores que superan el límite establecido: El Catorce, Taimeo, Urano, Fco. I. Madero, Cañada Los Lobos, Cañada Los Lobos II, Jeráhuaro, Carricitos, El Desierto y Queréndaro (con claves ECo23, ECa24, TMo23, TMa24, URo23, FMo23, CLo23, CLa24, CL2o23, CL2a24, JHa24, CRa24, EDa24, QRo24).

En algunos casos, superando los valores de las normas tres o hasta por 41 veces (0.795, 0.483, 0.623, 0.563, 0.506, 0.918, 2.081, 2.555, 3.659, 12.546, 0.354, 0.827, 2.998 y 0.380,

respectivamente) además, se tienen 3 muestras que se acercan bastante a este límite, superando los 0.20 mg/L siendo: ZMcaLVo23, ZPURa24 y ZPFMa24.

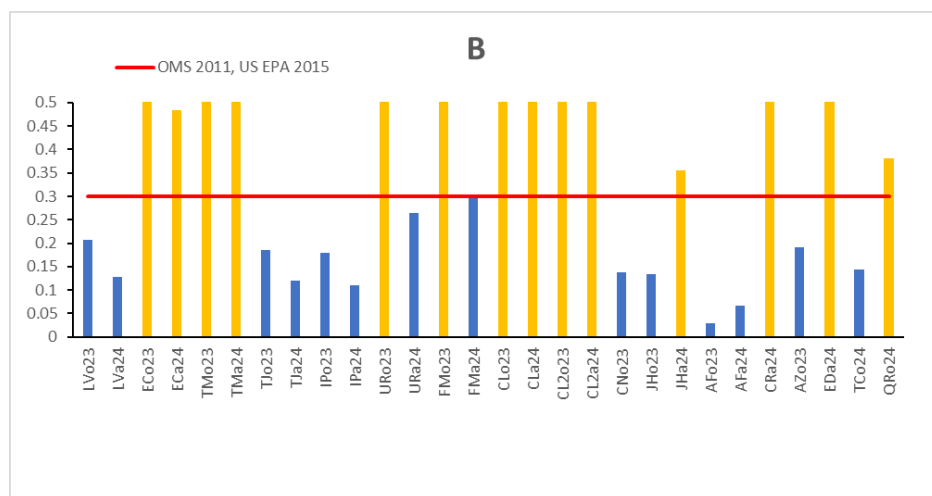


Figura 24. Diagrama de barras del B (mg/L) contra el Límite Máximo Permissible (LMP) de las Normas OMS 2011 y US EPA 2015. En color amarillos las muestras que sobrepasan el LMP de las normas y en color azul las muestras que están por debajo del LMP.

En relación con los estándares internacionales para la calidad del agua, diversos puntos de muestreo presentaron concentraciones de boro que exceden el límite máximo permisible de 0.300 mg/L. En la zona de Zinapécuaro, destacan los manantiales bajos Taimeo y El Desierto, el primero en ambas temporadas y el segundo en estiaje (TMo23, TMa24 y EDa24), además de los pozos Urano (URo23) y Fco. I. Madero (FMo23) durante la temporada de lluvias. Por su parte, el manantial alto El Catorce, que abastece a Ojo de Agua de Bucio, superó el límite en ambos periodos (ECo23, ECa24). En la región de Ucareo, los manantiales Cañada Los Lobos I y II (ambas temporadas) y Carricitos (estiaje) (CLo23, CLa24, CL2o23, CL2a24 y CRa24) mostraron anomalías similares. Finalmente, se registraron excedencias en el manantial Jeráhuaro (JHa24) y el pozo Queréndaro (ZPQRo24) durante las temporadas de estiaje y lluvias, respectivamente.

Los ríos que podrían verse afectados por el aporte de boro en los manantiales son: Taimeo (TMo23) que aporta al Río Zinapécuaro; El Catorce (ECa24) que aguas abajo se une al Río La Yerbabuena; Jeráhuaro (JHa24) sobre el Río Grande y las muestras de Cañadas Los Lobos, I y II y Carricitos (CLo23, CL2o23 y CRa24) que se unen al Río Laguna Larga.

7.3.2.3. Límite permisible de aluminio

A diferencia de otros elementos, el aluminio tiene una presencia muy baja o nula en la mayoría de los sitios de muestreo, lo que indica que podría no ser un contaminante generalizado en los cuerpos de agua de la región. Sin embargo, se observa una tendencia de picos críticos localizados en puntos muy específicos, principalmente en la zona de Lobos y Jeráhuaro. Esta distribución sugiere que su presencia no se debe a una característica regional del agua subterránea, sino a condiciones hidrogeológicas locales muy particulares. En la Figura 25 se puede apreciar que el aluminio tiene 3 muestras que superan el límite permisible de la NOM-127 2021, la cual comparte el mismo valor con la OMS 2011 de 0.200 mg/L, siendo: un manantial alto Cañada Los Lobos I en ambas temporadas y un manantial intermedio Jeráhuaro (CLO23, CLa24 y JHa24), superando las normas hasta por 9 veces (1.120, 1.944 y 0.321, respectivamente), los cuales abastecen a las localidades de Ucareo y Jeráhuaro. Para observar mejor el diagrama el aluminio se hizo una ampliación para no perder el comportamiento de las demás muestras que se encuentran bajo el LMP.

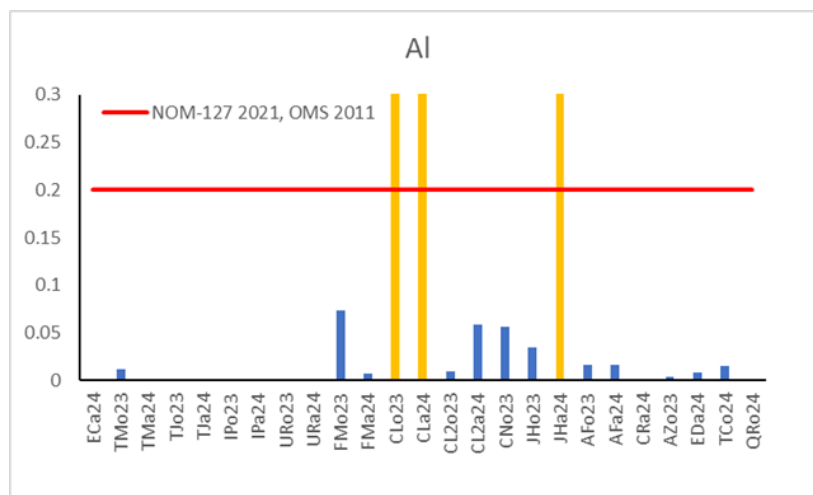


Figura 25. Diagrama de barras del Al (mg/L) contra el Límite Máximo Permisible de las Normas NOM-127 y OMS 2011. En color amarillos las muestras que sobrepasan el LMP de las normas y en color azul las muestras que están por debajo del LMP.

Los ríos afectados por este elemento que rebasa las normas son: el manantial Cañada Los Lobos I (CLO23) que se une al Río Laguna Larga aguas abajo y, el manantial Jeráhuaro (JHa24) que podría afectar al Río Grande.

7.3.2.4. Límite permisible de hierro

El análisis de la Figura 26 revela que el hierro no es un contaminante extendido en la zona de estudio, ya que la gran mayoría de las muestras presentan concentraciones extremadamente bajas o no detectadas analíticamente (barras azules casi imperceptibles). Se observa una tendencia de estabilidad temporal en casi todos los sitios, con la excepción de puntos muy específicos donde los niveles se disparan drásticamente en periodos determinados. Esta distribución sugiere que la presencia de hierro está ligada a condiciones muy localizadas, posiblemente relacionadas con variaciones específicas en el sitio.

Una muestra que supera el límite permisible de las normas NOM-127 2021 y OMS 2011 que comparten el mismo valor para este elemento (0.300 mg/L), es la que corresponde a Cañada Los Lobos I (CLa24) con 0.305 mg/L. Este manantial alto que rebasa el límite permisible abastece a la localidad de Ucareo. Y el río que se ve afectado por este manantial es el Río Laguna Larga, que se une aguas abajo.

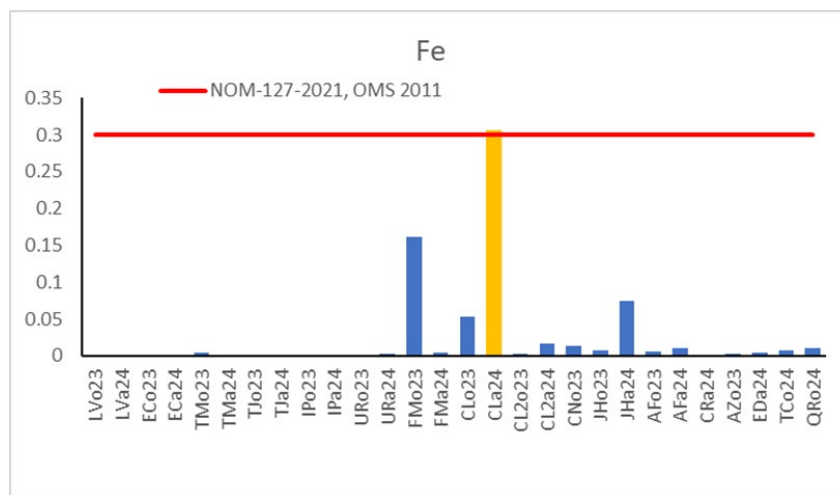


Figura 26. Diagrama de barras del Fe (mg/L) contra el Límite Máximo Permisible de las Normas NOM-127 y OMS 2011. En color amarillos las muestras que sobrepasan el LMP de las normas y en color azul las muestras que están por debajo del LMP.

7.3.2.5. Silicio

En México, el silicio no está regulado como un contaminante o parámetro de salud obligatorio en el agua para uso y consumo humano. La Organización Mundial de la Salud (OMS) en sus guías para la calidad del agua de consumo humano no establece un valor de referencia basado en la salud para el silicio y la EPA (Agencia de Protección Ambiental de

EE. UU.) no tiene estándares primarios (salud) ni secundarios (estéticos) para el silicio. Sin embargo, de acuerdo con algunos artículos, el silicio se puede considerar nefrotóxico (Swaminathan & Singh, 2022) y se encontró que en las guías australianas (NHMRC, 2011) para el agua potable menciona un valor de referencia técnico de 100 mg/L para el silicio, el valor de referencia se obtuvo utilizando datos toxicológicos de un estudio que examinó los efectos de la exposición a la sílice y que en este caso consideramos para revisar el comportamiento de los manantiales de la RMZ.

Como se observa en la Figura 27, la mayoría de las muestras se encuentran debajo de los 100 mg/L, lo que revela que el silicio es un elemento omnipresente y constante; algunas de las muestras se acercan al valor de referencia de la norma australiana. Por otro lado, se observa una variabilidad relativa temporal moderada entre los periodos de muestreo.

Son 4 las muestras que superan el valor de referencia (100 mg/L), siendo Taimeo, Urano y Lobos I (TMo23, Uro23, CLo23 y CLa24), donde el pico más alto lo presenta Lobos I (133.03 mg/L). Cerca de este valor se encuentran muestras de los sitios como Atzimba, Tinajas e Independencia (AZo23, TJo23 e IPo23).

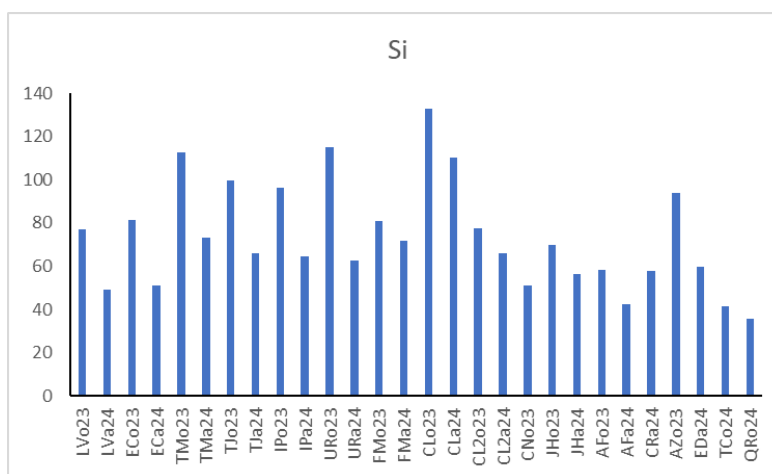


Figura 27. Diagrama de barras del Si (mg/L). Fuente: propia.

7.3.2.6. Síntesis de calidad del agua de acuerdo a los EPT

Con la finalidad de analizar las gráficas de los diferentes EPT, en la Tabla 8 se presenta una síntesis de los diferentes sitios y su relación con concentraciones de relativo riesgo de EPT. Se observa una tendencia de relativa toxicidad persistente en sitios específicos relacionados con la cabecera municipal de Zinapécuaro, que junto con Ucareo, son las localidades más

vulnerables, ya que presentan la mayor variedad de elementos tóxicos que superan las normas.

Por otro lado, en la Figura 28 se presenta un mapa de la RMZ que ilustra estos resultados y la distribución de relativa toxicidad de los sitios muestreados, donde solo dos sitios (Agua Fría y Tico; AFa24 y TCo24), presentarían buena calidad, mientras que 20 muestras indican una mala calidad en relación con la presencia de EPT en los sitios muestreados.

7.3.3. Índice de Calidad del Agua (ICA) de la RMZ

Se han medido y discutido los límites permisibles de los EPT de los manantiales de la RMZ, en la consideración de que en diversos organismos operadores se refieren a los índices de calidad de agua (ICA) para establecer recomendaciones a los usuarios. Como se mencionó en el apartado de metodología y en el Anexo VIII, el ICA es un valor que agrupa diversos parámetros (físicos, químicos y microbiológicos), para así transformar una gran cantidad de datos en un valor único y adimensional, lo cual ayuda a clasificar de manera general la calidad del agua en “buena o mala”.

En este caso, se usaron los siguientes parámetros fisicoquímicos y elementos: pH, T, TDS, Mg^{++} , Ca^{++} , K^{+} , Na^{+} , HCO_3^{-} , Cl^{-} , SO_4^{2-} , As, B, Al, Fe, Zn, Ba, Pb, Sb, Si, Sr y Cr. Para realizar el cálculo se siguieron los criterios de Varol *et al.* (2021), ya que se incluyen las concentraciones de arsénico. Así mismo, para establecer la ponderación se revisaron los trabajos de otros autores (Zakir *et al.*, 2020; Gruss, *et al.*, 2021; Peng, 2022).

En la Tabla 9 se presentan los resultados del cálculo del ICA (para ver el cálculo completo del índice revisar las tablas del Anexo VIII). Se observa que 20 de 28 muestras dan un resultado como agua excelente, 4 muestras como agua buena, 3 como agua mala y solo 1 muestra como agua no apta para beber.

Por otro lado, también se observa que el factor de la temporalidad del valor del ICA puede presentar variaciones que aparentemente no cambian mucho la calidad del agua, sin embargo, existe una tendencia relativamente preocupante en la zona de Lobos I y II, donde la calidad del agua se degrada sistemáticamente con el tiempo, pasando de niveles "pobres" a "no apta”.

Tabla 8. Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT), las normas que rebasan, el tipo de cuerpo de agua al que pertenece, localidad afectada, ríos afectados. Fuente: Propia.

Elementos Potencialmente Tóxicos	Sitios	Norma superada	Tipo	Localidades afectadas	Ríos Afectados
As	ZMabTMo23	NOM-127 2021	Manantial Bajo	Zinapécuaro	Río Zinapécuaro
	ZMabTMa24				
	ZMcaCL2a24		Manantial Alto	Ucareo	Río Laguna Larga
	ZPTJo23	OMS 2011 y EPA 2015	Pozo	Zinapécuaro	-
	ZPTJa24				-
	ZPIPo23				-
	ZPIPa24				-
	ZPFMa24				-
	ZMabAZo23		Manantial Bajo	-	
	ZPQRo24		Pozo	Queréndaro	-
B	ZAECo23	OMS 2011 y EPA 2015	Arroyo	Ojo de Agua de Bucio	Río La Yerbabuena
	ZAECa24				
	ZMabTMo23		Manantial Bajo	Zinapécuaro	Río Zinapécuaro
	ZMabTMa24				-
	ZPURo23		Pozo		-
	ZPFMo23				
	ZMcaCLo23		Manantial Alto	Ucareo	Río Laguna Larga
	ZMcaCLa24				
	ZMcaCL2o23				
	ZMcaCL2a24				
	ZMciJHa24		Manantial Intermedio	Jeráhuaro	Río Grande
	ZMcaCRa24		Manantial Alto	Ucareo	Río Agrio
	ZMcbEDa24		Manantial Bajo	Zinapécuaro	-
	ZPQRo24		Pozo	Queréndaro	-
Al	ZMcaCLo23	NOM-127 2021 y OMS 2011	Manantial Alto	Ucareo	Río Laguna Larga
	ZMcaCLa24				
	ZMciJHa24		Manantial Intermedio	Jeráhuaro	Río Grande
Fe	ZMcaCLa24	NOM-127 2021 y OMS 2011	Manantial Alto	Ucareo	Río Laguna Larga

Aunque se discute adelante con mayor detalle, se anticipa que las estimaciones del ICA para la RMZ que, señalan un relativo predominio de buena calidad para la mayoría de las fuentes de abastecimiento, si consideramos que también en la mayoría de los sitios se detectaron uno o más elementos potencialmente tóxicos, las estimaciones del ICA pueden ser engañosas y derivar en recomendaciones riesgosas para su consumo.

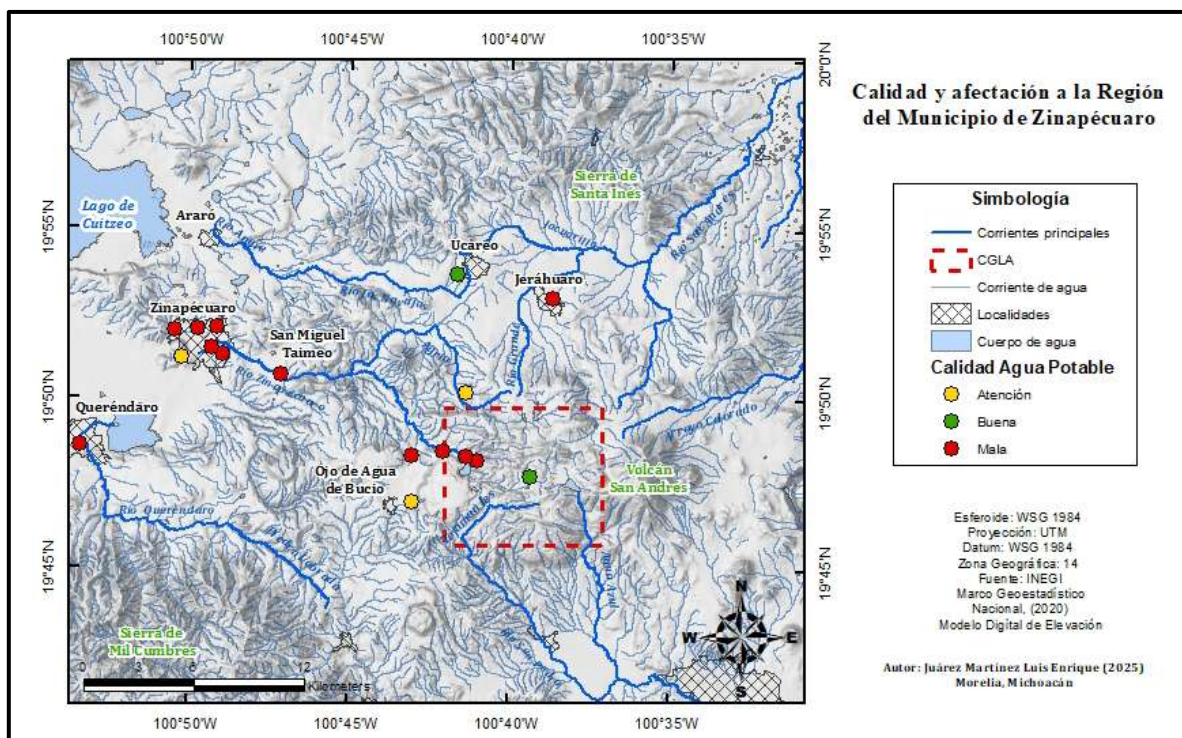


Figura 28. Mapa de afectación de EPT (As, B, Fe y Al) en la RMZ, muestra cuales son los puntos que están por arriba del valor de las normas. Fuente: Propia.

Tabla 9. Valores obtenidos del ICA y tabla de tipo de agua, tomada de Varol et al. (2021).

Muestra	ICA		
LVo23	27.6	CLo23	110.1
LVa24	21.7	CLa24	143.9
ECo23	41.2	CL2o23	102.3
ECa24	30.3	CL2a24	372.5
TMo23	69.4	CNo23	24.7
TMa24	61.9	JHo23	29.5
TJo23	43.2	JHa24	38.6
TJa24	36.6	AFo23	20.1
IPo23	42.0	AFa24	18.1
IPa24	36.1	CRa24	35.7
URo23	49.1	AZo23	41.3
URa24	34.4	EDa24	93.7
FMo23	54.8	TCo24	23.0
FMa24	40.9	QRo24	36.3

Range	Type of water
< 50	Excellent water
50–100.1	Good water
100–200.1	Poor water
200–300.1	Very poor water
> 300	Water unsuitable for drinking purposes

De hecho, de acuerdo con Chidiac *et al.* (2023) el eclipsamiento del ICA es uno de los mayores problemas y ocurre cuando la calidad general reportada por el índice parece aceptable, a pesar de que uno o más parámetros individuales reflejan niveles de contaminación peligrosos. Los autores sugieren que es probable tener pérdida de información, ya que al agrupar múltiples variables en un solo número se pierde el detalle sobre las interacciones entre parámetros y las características específicas de cada contaminante.

Capítulo VIII. Discusión



8.1. Distribución espacial y variaciones de los sitios de abastecimiento de agua de la RMZ

Como se estableció previamente, el diseño de muestreo en la RMZ se llevó a cabo ubicando los sitios con las comunidades y a su vez considerando su relación con la red hidrográfica. Este enfoque permitió obtener muestras representativas tanto dentro de los límites del Campo Geotérmico Los Azufres (CGLA) como en sus inmediaciones, logrando una distribución geográfica amplia que se complementó con datos históricos de la zona.

Con base en la descripción de las condiciones físicas de las fuentes de abastecimiento en la RMZ, al confrontar con el Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento – Obras de Captación Superficiales establecido por CONAGUA (2015), revela que los manantiales en general no cumplen en términos de seguridad hídrica; y que se encuentran en condiciones de una importante exposición total a contaminantes externos, debido a que los manantiales están relativamente abiertos o mal preservados, no se potabiliza el agua y se expone a la población a contaminantes patógenos, violando el principio de aislamiento hermético que exige el manual.

Las malas condiciones y vulnerabilidad física en los manantiales de la RMZ se relacionan por un lado por la ausencia rectora del Estado en términos de garantizar el agua potable a la población y, por otro lado, con los índices de marginalidad y pobreza que caracterizan a la región, el 44.7 % de la población de Zinapécuaro vive en pobreza moderada y un 7.8 % en pobreza extrema. Lo cual actúa como una barrera limitante para el cuidado a la infraestructura

de saneamiento adecuada y así poder garantizar la captación, transporte y distribución de agua realmente potable. El manual de CONAGUA (2015) es explícito al señalar que todo manantial debe contar con una "cámara con muros y cubierta que aisle el manantial del exterior" para protegerlo de polvo, basura y animales. La inspección en campo evidenció que manantiales como Atzimba y Agua Fría se encuentran "abiertos", y otros como El Catorce presentan su infraestructura de captación colapsada o destruida, y en las localidades rurales como Tico, Ucareo, La Yerbabuena, Ojo de Agua de Bucio se presenta una gestión con evidentes deficiencias operativas. Como en casi todo el país, en las zonas rurales, la gestión del agua recae enteramente en los habitantes, derivando del relativo abandono de estas localidades, ya sea por la falta de recursos económicos y técnicos, como por una estructura ordenada de mantenimiento.

En contraste con los manantiales, los pozos concentrados en la cabecera municipal de Zinapécuaro y Queréndaro, son operados por un organismo operador (OOAPAS) y muestran un relativo cumplimiento de la normativa de protección, sin embargo, se observan deficiencias de mantenimiento y operación. Todos se encuentran ubicados dentro de predios bardeados o delimitados por malla ciclónica, cumpliendo estrictamente con la necesidad de un "cercado perimetral" para restringir el acceso no autorizado. Se incluyen casetas de desinfección (cloración) y control de bombas, esto reduce drásticamente la vulnerabilidad del recurso frente a contaminantes superficiales y biológicos. Sin embargo, es notable que, en pozos como Queréndaro, la operación sea continua (pozo artesiano) para evitar pérdidas, lo que implica un desafío operativo distinto.

En suma, la problemática del agua de la RMZ no se debe a una escasez del recurso hídrico pues los manantiales siguen activos, sino a la incapacidad técnica y económica para protegerlos. Esto tiene implicaciones sanitarias graves, ya que el problema se agrava al considerar los indicadores socioeconómicos reportados por Hernández-Santoyo (2025), donde el 38.4 % de la población es vulnerable por carencias sociales, así el 78.7 % de la población carece de acceso a la seguridad social y el 41.6 % a servicios de salud.

8.2. Variabilidad de las facies hidrogeoquímicas de la RMZ

Con la finalidad de complementar las bases de datos hidrogeoquímicos, se procedió a la integración de datos de sitios de investigaciones previas: González-Partida (1999 y 2000),

Birkle & Merkel (2000), Israde (2002), Viggiano (2003), Segovia (2005), Panduro-Hernández (2006), Abuharara (2017), Prieto (2017), Vigil-Barrientos (2017), Núñez-Hernández (2019), Gómez-Cruz (2020) y Pérez (2021). En el mapa de la Figura 29, se visualiza la distribución espacial conjunta de todos los sitios que son considerados en la discusión. Cabe destacar que, se anexan de la localidad de Araró, extendiéndose hacia un área baja de la cuenca en el Lago de Cuitzeo, caracterizada por sus manantiales y por ser considerada una zona anómala de concentración de arsénico (Pérez *et al.*, 2021).

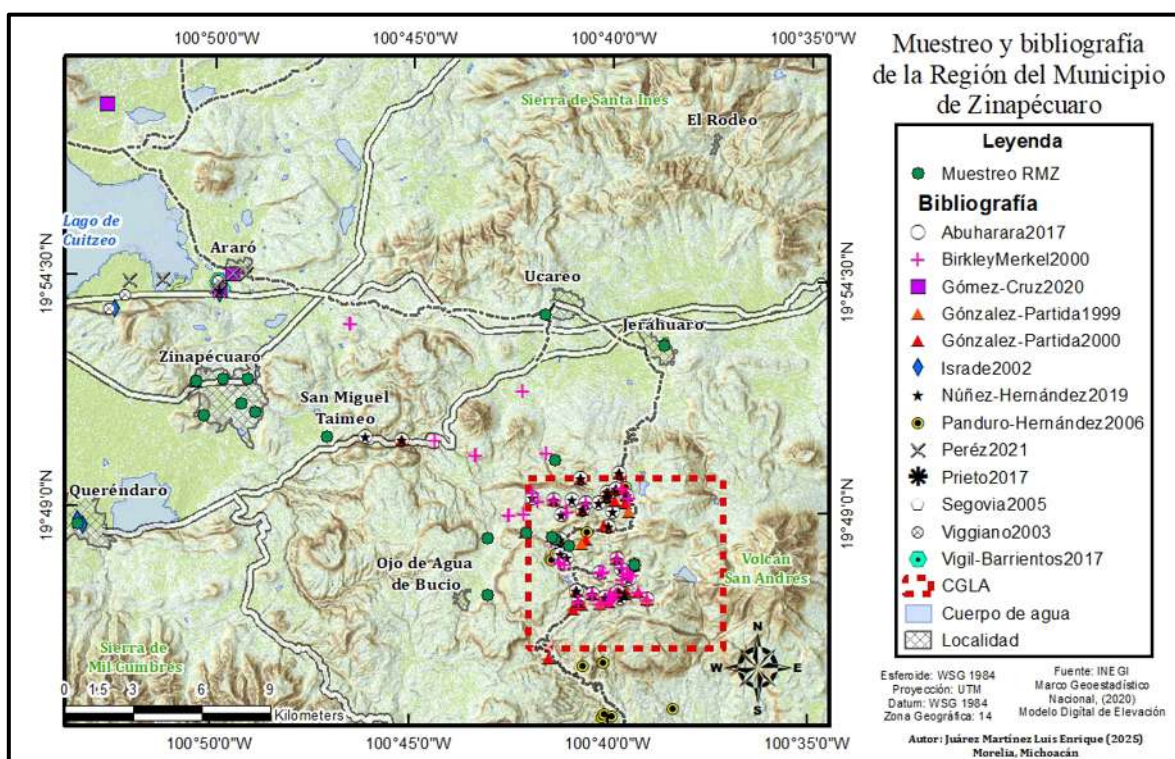


Figura 29. Mapa de distribución de las muestras de este trabajo y de referencias en la RMZ. Fuente: Propia.

Para dimensionar la correlación o potencial impacto de la actividad geotérmica sobre los recursos hídricos de la RMZ, los datos de la RMZ se han proyectado con los datos reportados por Birkle & Merkel (2000), quienes analizaron muestras de ríos y pozos geotérmicos en el área de influencia del Campo Geotérmico Los Azufres (CGLA).

En la Figura 30, se presenta la proyección en los diagramas de Piper de los datos propios de este trabajo y de aquellos recopilados de trabajos previos. Se observa un relativo predominio de la facie Bicarbonatada Sódica ($\text{Na}^+\text{-HCO}_3^-$), presente en el 47% de las muestras, incluyendo los pozos y manantiales bajos como Taimeo y Atzimba, estos sitios se encuentran

asociados a acuíferos y flujos emplazados en unidades volcánicas félsicas a intermedias. La homogeneidad hidrogeoquímica de estas muestras sugiere que, a pesar de la variabilidad superficial de las unidades volcánicas Plio-Cuaternarias (conos, piroclastos y derrames de lavas), los pozos y manantiales bajos drenan controlados por un mismo sistema hidrogeológico regional alojado en el basamento fracturado.

En contraste, el 33% de las muestras de los manantiales altos: El Catorce, Cañadas Los Lobos I y II, exhiben una tendencia a facie clorurada/sulfatada sódica. Su posición geográfica señala una mayor influencia y relación con el Campo Geotérmico Los Azufres (CGLA), así como desde el punto de vista geológico (ver mapa de la Figura 6), se observa una relación estrecha con una mayor densidad de fallamiento y fracturamiento de domos riolíticos propios del CGLA. La composición química sugiere que estos manantiales intermedios podrían representar manifestaciones superficiales de agua producto de la interconexión vertical entre el reservorio geotérmico y los acuíferos locales.

Por su parte, la variabilidad y aparente heterogeneidad geoquímica observada en los manantiales intermedios (Tico y Jeráhuaro), resalta el papel del control estructural relativamente transicional entre los manantiales altos y bajos, así como la interacción de flujos subterráneos complejos antes de la exposición a la superficie y de ser captados por la población en forma de manantiales. En particular, se observa que el manantial de Jeráhuaro podría tener influencia de unidades superficiales recientes y la zona de Marítaro podría tener influencia del CGLA. Sin embargo, el manantial de Tico muestra una composición distinta al resto de los manantiales, aparentemente asociado a la Sierra de Santa Inés, caracterizada por una unidad de ignimbritas del Mioceno, que presenta un sistema hidrográfico diferente al CGLA.

La tendencia de un relativo aumento de sulfatos y cloruros en la muestra de agua superficial o de río, así como un pH ácido (entre 3 y 4), sugiere una anomalía geoquímica que no puede ser explicada por un sistema natural, ya que contrasta notablemente con las aguas de otros manantiales y se relaciona mucho más con las aguas de origen hidrotermal y geotérmico, ya que se agrupa con las muestras proyectadas de los datos de Birkle y Merkel (2000). El diagrama de Piper de la Figura 30, muestra un patrón geoquímico contundente; tanto las muestras de pozos geotérmicos (círculos rojos) como las muestras de ríos (círculos azules),.

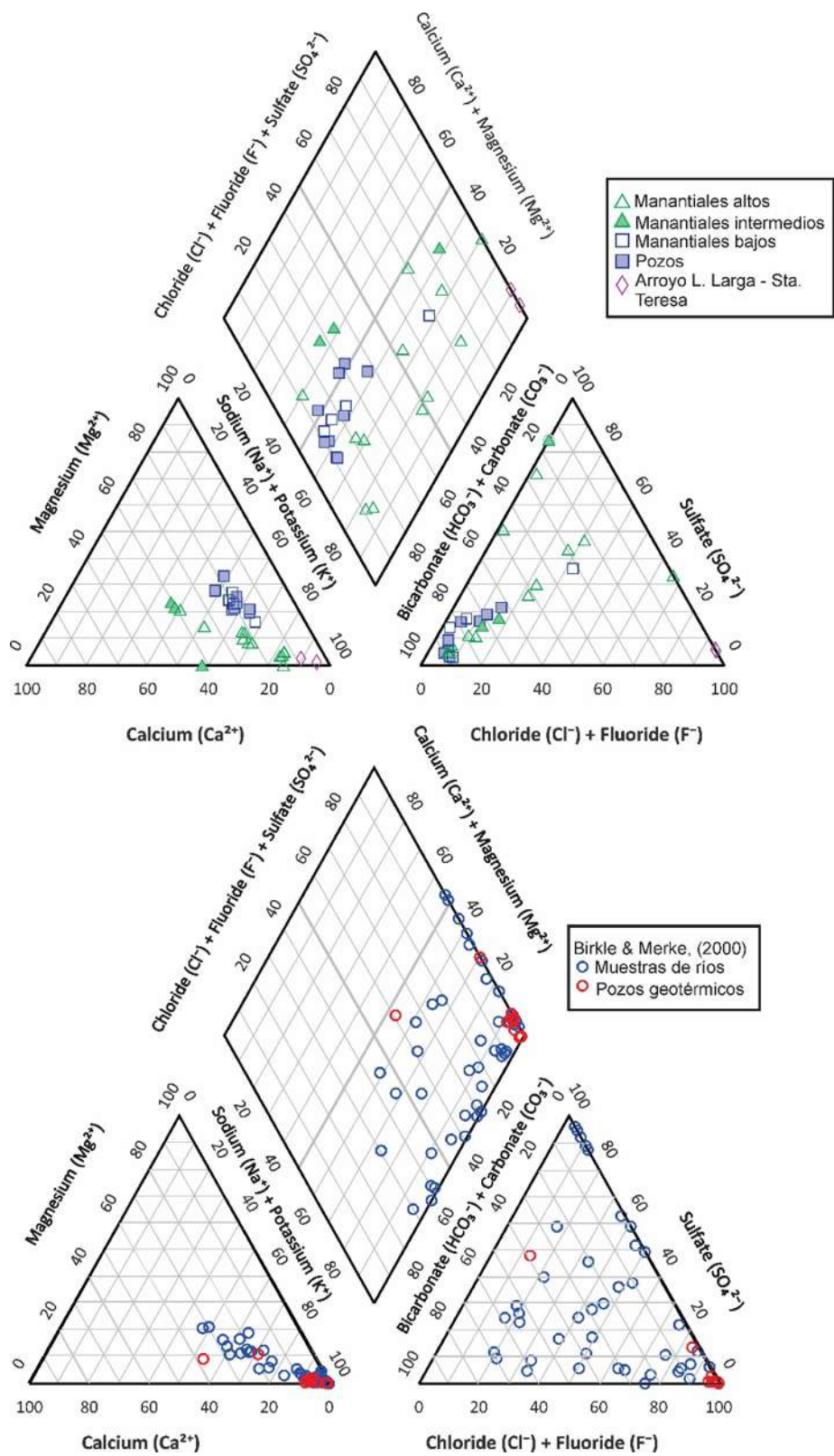


Figura 30. Diagramas de Piper de las muestras de la RMZ (izquierda) en comparación con las muestras analizadas por Birkle & Merkel, (2000), de ríos y pozos geotérmicos (derecha). Fuente Propia.

se agrupan casi en su totalidad en el extremo derecho del rombo, definen una facie Clorurada-Sódica de alta salinidad.

Este comportamiento evidencia que los cuerpos de agua superficiales en ríos actúan prácticamente como canales de drenaje de salmueras geotérmicas, perdiendo su carácter meteórico original.

Las variaciones hidrogeoquímicas de las fuentes de abastecimiento del RMZ sugieren que se relacionan a procesos de interacción agua-roca, pero sobre todo a la influencia antropogénica de las emisiones del CGLA. Para identificar con mayor claridad los componentes ideales o *end member* de los diferentes tipos de agua, en la Figura 31 se presenta la proyección de los diagramas de Stiff que ilustran cada grupo de agua.

El sitio del manantial de Agua Fría de este estudio y denominada Camp. Agua Fría (González-Partida, 2000) representa un manantial alto sin la influencia del CGLA, con un TDS extremadamente bajo (51 mg/L) y una topología estrecha y vertical, esta muestra tipifica el agua de infiltración reciente o de flujo local somero. Su composición está dominada por el equilibrio bicarbonatado mixta ($\text{Na}^+\text{-HCO}_3^-$), reflejando una nula interacción e influencia geotérmica.

En el extremo opuesto, el diagrama del Pozo AZ-2 (Birkle & Merkel, 2000) exhibe la topología típica de la "salmuera geotérmica" del Campo Geotérmico Los Azufres en forma de "embudo", con un TDS masivo de 3,367 mg/L, la predominancia absoluta de Sodio (Na^+) y Cloruro (Cl^-) define a este fluido profundo.

La muestra de Zimirao (González-Partida, 2000) corresponde a una tendencia típica de un manantial termal que podría también sugerir variaciones y mezcla entre aguas de tipo profundo y superficial. Su topología es similar a la del pozo geotérmico AZ-2, pero ligeramente diluida (TDS = 2,168 mg/L), esto confirma que las aguas termales que afloran en la región pueden presentar composiciones variables asociadas a la mezcla de aguas meteóricas y termales, así como su potencial mezcla con fluidos del reservorio geotérmico que han ascendido rápidamente con una dilución moderada, conservando su alta salinidad (facie Clorurada-Sódica).

Finalmente, el diagrama de la muestra del pozo Francisco y Madero (FMo23), presenta una topología híbrida crucial para el diagnóstico. Presenta un aumento de salinidad, su TDS (196 mg/L) es casi cuatro veces mayor que el agua meteórica (Camp. Agua Fría), lo que indica procesos de mineralización activos o mezcla.

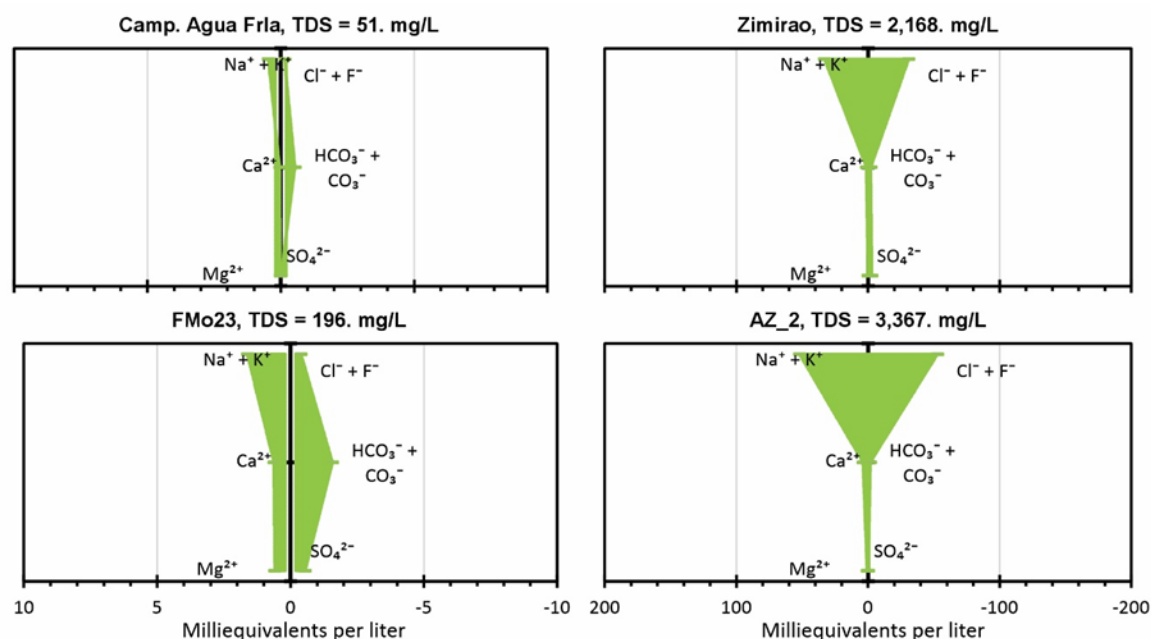


Figura 31. Diagramas de Stiff de la bibliografía y propia. Como muestra meteórica Camp. Agua Fría (González-Partida, 2000), como muestra de Pozo de abastecimiento Fco. I. Madero (FMo23), como muestra Termal Zimirao (González-Partida, 2000) y como muestra Geotérmica Pozo AZ_2 (Birkle & Merkel, 2000) Fuente: Propia.

A diferencia de la línea vertical del agua meteórica del sitio de Agua Fría, la muestra FMo23 muestra un ensanchamiento significativo en la parte superior del diagrama, correspondiente al vértice de Sodio ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$) y Bicarbonato (HCO_3^-). Esta topología de "punta de flecha" del Pozo Fco. I. Madero se puede interpretar como una fase temprana de mezcla, el agua extraída para consumo humano en el pozo no es simplemente agua de lluvia infiltrada; ha comenzado a recibir aportes de fluidos ricos en sales. Si bien aún no alcanza las concentraciones de cloruros del *end member* termal/geotérmico (Zimirao/AZ_2), el enriquecimiento en sodio respecto al calcio/magnesio sugiere que el frente de mezcla geotérmica ya está interactuando con este pozo.

El análisis de las facies hidrogeoquímicas en la RMZ revela una heterogeneidad que no es aleatoria, que responde a la complejidad de la interacción agua-roca con las unidades geológicas y estructurales del Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato, sin embargo se

observan variaciones y tendencias que sugieren procesos variables de evolución del agua subterránea asociados con flujos regionales y procesos de mezcla con fluidos de origen geotérmico controlados por fallas o pérdidas de emisión de origen antropogénico.

8.3. Diagnóstico de calidad del agua

Al contrastar los resultados del cálculo del ICA con los parámetros físicos y las concentraciones normadas (NOM-127, OMS 2011 y EPA 2015), surge una controversia alarmante, si bien el cálculo del ICA clasifica a 20 de las 28 muestras como "Agua Excelente" y 4 como "Buena", este indicador general enmascara riesgos agudos de toxicidad por Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT). Esta discrepancia se debe a que en cálculos de la metodología del ICA descrito por Chidiac *et al.* (2023), se promedian múltiples variables y generan un valor adimensional, por lo que diluye el peso específico de contaminantes en elementos traza.

Por tanto, el ICA no expresa correctamente el riesgo del contexto geológico de la RMZ. Por ejemplo, se identificaron problemas críticos de calidad que el ICA no refleja adecuadamente:

- **Arsénico:** El problema del arsénico (As) es crítico; 10 muestras superan el límite de 0.010 mg/L. La afectación no se limita a manantiales aislados; es especialmente preocupante que los pozos que abastecen a las localidades más grandes, como Tinajas, Independencia y Queréndaro, presentan concentraciones fuera de norma en ambas temporadas (precipitación y estiaje). El caso extremo se registra en Cañada Los Lobos II (CL2a24), donde la concentración alcanza 0.127 mg/L, superando la norma casi 13 veces.
- **Exceso de Boro:** El 50% de las muestras exceden el límite internacional de 0.300 mg/L (OMS/EPA). Este elemento confirma la influencia geotérmica y alcanza niveles de toxicidad extrema en sitios como Cañada Los Lobos, con excesos de hasta 41 veces el límite permitido.
- **La acidez** es otro factor de riesgo subestimado, aunque la mayoría de los pozos son alcalinos, hay valores de pH ácidos (< 6.5), registrados en 11 muestras y llegando a 5.8 en el sitio denominado El Catorce, por lo que se podrían tener implicaciones graves como la solubilidad de metales: La acidez favorece la disolución de aluminio (Al) y hierro (Fe). Esto explica por qué sitios ácidos como Cañada Los Lobos I y

Jeráhuaro, son precisamente los que presentan picos de Al que superan hasta 9 veces la norma (1.944 mg/L en CLa24), así como concentraciones de Fe por encima del límite de 0.300 mg/L de la NOM-127 y OMS 2011.

La integración de datos químicos y espaciales demuestra que la contaminación en la RMZ no es regional, aunque sí puntual y sistémica con potencial de dispersión. La contaminación de las fuentes tiene un efecto desencadenado, el manantial Cañada Los Lobos II (alto en As, B, Na) descarga en el Río Laguna Larga; Taimeo (alto en As, B) afecta al Río Zinapécuaro; y El Catorce (ácido, alto en B) impacta al Río La Yerbabuena, esto implica que el riesgo toxicológico se extiende más allá del consumo directo, afectando potencialmente la agricultura y ecosistemas acuáticos aguas abajo.

Considerando que la contaminación principal es de EPT, las soluciones convencionales de desinfección (cloración) son insuficientes e ineficaces para remover sales y metaloides. Se proponen las siguientes alternativas jerarquizadas:

- Protección de Fuentes y Monitoreo: Se refiere a los manantiales que no cumplen con los requisitos de obra obligatorios del Manual de CONAGUA (2015) para utilizarse como agua de consumo y uso humano como lo son: Cañada Los Lobos I y II, Los Veneros, El Catorce, Agua Fría, Canoitas, Carricitos, Jeráhuaro, Taimeo, Reino de Atzimba y Tico. Así mismo, dado que muestras como CLa24 presentaron errores de balance iónico del -42% sugiriendo contaminación externa o iones no medidos, es urgente mejorar la infraestructura física de captación en manantiales abiertos para evitar contaminación superficial cruzada.
- Tratamiento Avanzado para Pozos (As y B): Para los pozos de abastecimiento (Tinajas, Independencia, Queréndaro) que presentan facies Bicarbonatadas Sódicas, pero con arsénico y boro, se recomienda la implementación de sistemas de Ósmosis Inversa (OI) a pie de pozo. La OI es la tecnología más efectiva para la remoción simultánea de arsénico y boro disuelto, además de reducir la salinidad total (Saitúa *et al.*, 2005). Alternativamente, para caudales menores, se pueden utilizar filtros de adsorción altamente selectivos para el As.
- Neutralización y Precipitación (Manantiales Ácidos): Para manantiales como Los Veneros, El Catorce y Cañada Los Lobos, que presentan pH ácido y metales (Al, Fe),

la alternativa costo-efectiva es la instalación de contactores de calcita (piedra caliza). El paso del agua por un lecho de carbonato de calcio elevará el pH a rangos neutros (>7.0), provocando la precipitación natural del Aluminio y el Hierro, que quedarán retenidos en el filtro (Cravota & Trahan, 1999), volviendo el agua apta según la NOM-127.

8.4. Principales procesos hidrogeoquímicos de la RMZ

En la tabla 10 se presenta el resultado del cálculo de la matriz de correlación de Pearson (r), aplicada a los iones mayoritarios y elementos traza de la RMZ. A partir de la observación general se distinguen tres clústeres geoquímicos principales que gobiernan la calidad del agua en la RMZ. Estos agrupamientos estadísticos confirmarían la coexistencia de un sistema de flujo regional meteórico y un potencial sistema de mezcla por el aporte geotérmico.

Se observa una correlación positiva fuerte y significativa entre el ion bicarbonato (HCO_3^-) y cationes clave como el magnesio ($r=0.812$) y el sodio ($r=0.740$). Esta correlación lineal se relaciona a su vez con el proceso de interacción agua-roca y flujo regional de los iones: $\text{HCO}_3^- - \text{Na}^+ - \text{Mg}^{2+}$. Este proceso correspondería a la evolución natural del agua subterránea a través de la interacción con las unidades geológicas esencialmente volcánicas de la RMZ. Por otro lado, esta asociación geoquímica sería consistente con la hidrólisis de silicatos, específicamente la meteorización de las plagioclasas (feldespatos sódicos-cálcicos) presentes en las andesitas, riolitas y dacitas que conforman el CGLA.

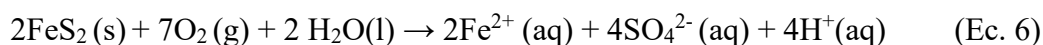
El hecho de que el calcio también muestre una correlación moderada-alta con el magnesio ($r=0.770$) y el sodio ($r=0.598$) sugiere que estas aguas han tenido un tiempo relativo de residencia suficiente para alcanzar un equilibrio catiónico, definiendo así la facie bicarbonatada sódico/cálcica. El hallazgo más crítico de este análisis es el clúster de correlación de elementos geotérmicos ($\text{Cl}^- - \text{B} - \text{As} - \text{Cs}$), es decir la huella geotérmica en los manantiales de consumo humano de la RMZ. En particular, validaría estadísticamente la correlación del arsénico y boro como elementos contaminantes y de mezcla de agua. El cloruro (Cl^-) como un ion conservativo típico de fluidos profundos, muestra una correlación extremadamente fuerte con el boro ($r=0.925$). A su vez, el boro actúa como el vehículo principal de otros elementos traza, correlacionándose fuertemente con el arsénico ($r=0.797$), el antimonio ($r=0.924$), el cesio ($r=0.939$) y el uranio ($r=0.978$).

Tabla 10. Correlación de Pearson con los iones mayoritarios y los elementos potencialmente tóxicos.

	HCO3-	SO4 2-	Cl-	Ca	Mg	Na	K	SiO2	B	As	Al	V	Mn	Fe	Zn	Sr	Ba	Sb	Hg	Cr	Cs	Rb	U
HCO3-	1																						
SO4 2-	-0.010	1																					
Cl-	-0.037	0.413	1																				
Ca	0.569	0.160	0.420	1																			
Mg	0.812	-0.034	0.091	0.770	1																		
Na	0.740	0.288	0.537	0.598	0.748	1																	
K	-0.138	0.771	0.474	0.168	-0.046	0.254	1																
SiO2	0.426	0.317	-0.097	0.133	0.189	0.297	0.195	1															
B	-0.121	0.517	0.925	0.224	-0.117	0.416	0.485	0.067	1														
As	0.710	0.127	0.754	0.244	0.128	0.565	0.107	0.038	0.797	1													
Al	0.064	0.683	-0.168	-0.233	-0.372	-0.196	0.434	0.615	0.114	-0.161	1												
V	0.706	-0.270	-0.194	0.215	0.599	0.519	-0.314	0.102	-0.215	0.261	-0.263	1											
Mn	0.036	0.686	-0.191	-0.263	-0.338	-0.182	0.451	0.575	0.118	-0.138	0.991	-0.236	1										
Fe	0.165	0.603	-0.063	-0.055	-0.165	-0.050	0.350	0.331	0.111	-0.127	0.823	-0.226	0.771	1									
Zn	-0.234	0.628	-0.137	-0.234	-0.297	-0.140	0.388	0.024	0.007	-0.163	0.459	-0.256	0.465	0.407	1								
Sr	0.146	0.358	0.684	0.811	0.501	0.503	0.420	-0.159	0.453	0.320	-0.251	-0.087	-0.289	-0.074	0.114	1							
Ba	-0.282	0.472	0.902	0.421	-0.025	0.304	0.507	-0.191	0.832	0.586	-0.097	-0.311	-0.110	-0.027	0.159	0.777	1						
Sb	0.592	0.344	0.880	0.243	-0.036	0.430	0.266	0.019	0.924	0.918	-0.035	-0.115	-0.070	0.012	-0.059	0.433	0.754	1					
Hg	0.231	0.518	0.573	0.476	0.338	0.424	0.070	0.316	0.681	0.232	-0.110	0.263	-0.037	-0.302	-0.162	0.499	0.613	0.096	1				
Cr	0.164	-0.032	0.021	0.466	0.158	-0.150	0.215	-0.020	-0.068	-0.093	-0.035	-0.143	-0.054	-0.045	-0.080	0.322	0.156	0.016	-0.135	1			
Cs	-0.223	0.410	0.830	0.087	-0.191	0.340	0.368	0.069	0.939	0.862	0.136	-0.192	0.140	0.088	0.070	0.319	0.723	0.966	-0.082	-0.068	1		
Rb	-0.218	0.423	0.028	0.012	-0.108	-0.049	0.421	0.509	0.104	-0.179	0.315	-0.422	0.341	0.109	0.372	0.063	0.123	-0.029	0.025	0.159	0.096	1	
U	0.143	0.669	-0.135	-0.044	-0.023	0.040	0.424	0.550	0.063	-0.197	0.978	-0.179	0.878	0.667	0.447	-0.106	-0.137	-0.108	0.035	-0.049	0.078	0.327	1

La presencia de elementos litófilos raros como el cesio (Cs) y el rubidio (Rb) asociados al arsénico, sugiere que los fluidos superficiales han interactuado con rocas y fluidos profundos. Esto se explica, por un lado, por el control estructural de la RMZ: la Falla Huajúmbaro-Zinapécuaro y el sistema de fracturas NO-SE actúan como conductos preferenciales de alta permeabilidad vertical y, por otro lado, estas mismas estructuras asociadas con el sistema de pozos productivos del CGLA, permiten que los fluidos de origen geotérmico, ricos en cloruros y metaloides, asciendan y se mezclen con los acuíferos someros, dando lugar a las altas concentraciones de As y B en los sitios de muestreo.

Finalmente, se identifica un tercer grupo de correlación lineal que explicaría la movilidad de metales en ambientes ácidos ($\text{Al-Fe-Mn-SO}_4^{2-}$) y su relativa toxicidad en manantiales específicos. Existe una correlación casi perfecta entre el aluminio y el manganeso ($r=0.991$), y muy alta entre el aluminio y el hierro ($r=0.823$). Es crucial notar que el aluminio también se correlaciona positivamente con el anión sulfato (SO_4^{2-} , $r=0.683$). Geológicamente, esto sugeriría que, en zonas de descarga hidrotermal, la oxidación de sulfuros acidifica el medio:



Como se discutió en el diagnóstico de calidad, aunque los valores de pH tienden a estar alrededor de 6, su variabilidad y relativa tendencia ácida, podría aumentar la solubilidad de los metales, incluyendo los EPT. Por lo tanto, las concentraciones anómalas de aluminio y hierro detectadas en manantiales como Cañada Los Lobos y El Catorce, responderían a procesos locales de acidificación geotérmica que, diferenciaría la geoquímica de las aguas del flujo regional migrando de neutro-alcalino a relativamente ácido.

Una vez definidas las facies hidrogeoquímicas y las correlaciones estadísticas entre iones, se recurre al análisis gráfico para discriminar los *end member* mediante los diagramas de Gibbs y Giggenbach, y evaluar el grado de interacción con el acuífero.

De acuerdo con el diagrama de Gibbs de la Figura 32, la mayoría de las muestras, exceptuando las muestras del arroyo Laguna Larga-Santa Teresa y el manantial alto de Los Lobos I, se agrupan en el extremo izquierdo del diagrama, sugiriendo salinidades relativamente medias a bajas y aparentemente dominadas por un proceso de interacción con la roca. Sin embargo, se observan ciertas tendencias y diferencias que es oportuno mencionar.

Las muestras de Agua Fría (AFa24 y AFo23) se proyectan debajo de todo el grupo sugiriendo un sistema de flujo muy somero y relativamente rápido; mientras que las muestras dispersas a la derecha del diagrama: Carricitos, El Catorce, Cañada Los Lobos II y el Desierto (CRa24, ECo23, ECa24, CL2o23, CL2a24 y EDa24) tienen una disminución en los TDS, lo cual puede sugerir cambios en el mismo dominio o una transición al dominio de precipitación. En particular, se observan 3 muestras que se proyectan en el extremo derecho del diagrama: Cañada Los Lobos II (CL2a24) siendo esta la que se encuentra en la parte inferior, mientras que las que se encuentran en la parte superior corresponden al Arroyo L. Larga (ACL2o23 y ACL2a24), estas muestras asociadas a un cuerpo superficial, se desplazan hacia la derecha (aumento de la relación $\text{Cl}^-/(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$) y hacia arriba en TDS, lo que sugiere un proceso más complejo o bien, una mezcla incipiente con fluidos geotérmicos que llegan al cauce.

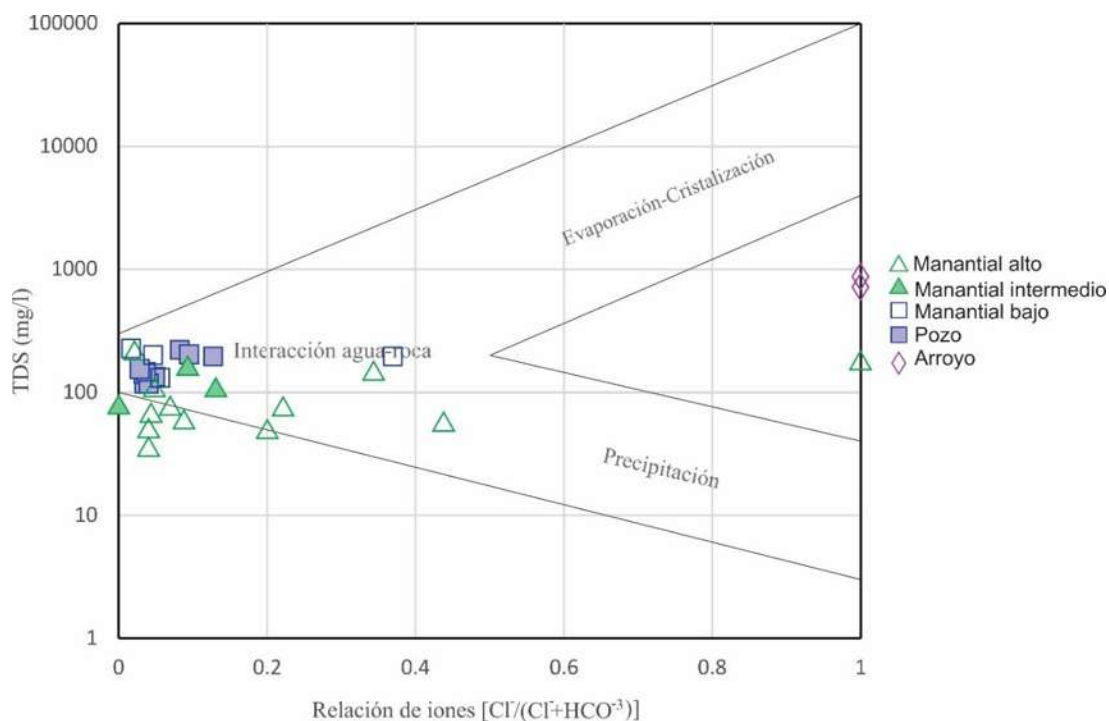


Figura 32. Diagrama de Gibbs que muestra los mecanismos de control de las muestras. Fuente: Propia.

En el diagrama ternario Na–K–Mg de Giggenbach (Figura 33) la mayor parte de los sitios, a excepción de Tico, se proyectan en el vértice inferior derecho del magnesio y en el campo de “aguas inmaduras”. Sin embargo, la proyección es relativamente dispersa, indicando una relativa variación entre los diferentes sitios de muestreo.

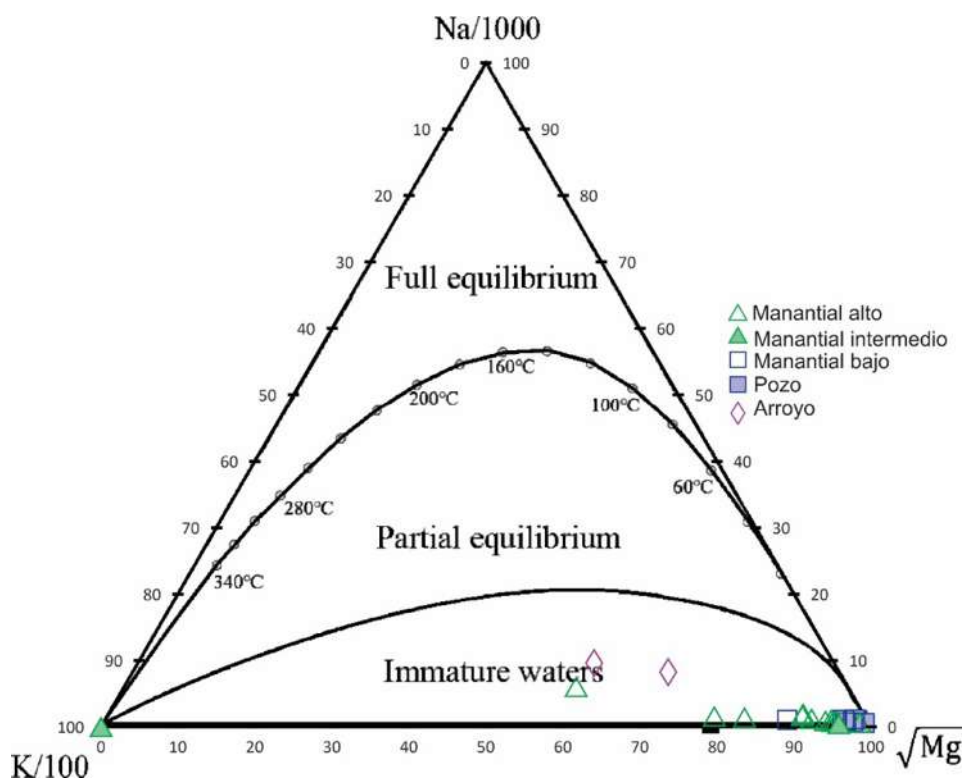


Figura 33. Diagrama de Giggenbach que muestra la madurez del agua. Fuente: Propia.

El relativo enriquecimiento de magnesio podría provenir de la alteración de minerales ferromagnesianos (piroxenos, anfíboles) abundantes en las andesitas basálticas del Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato. Sin embargo, para que esto ocurra se requiere un mayor tiempo de estadía que no sería congruente con el diagrama de Gibbs de la Figura 32. Por lo tanto, este patrón podría sugerir que los manantiales y pozos de la RMZ podrían haberse enriquecido por medio de la mezcla de fluidos sin alcanzar un equilibrio termodinámico.

8.5. Modelado isotópico y evidencia de mezcla de agua meteórica y geotérmica

En el entendido que los diagramas convencionales de Gibbs y Giggenbach proporcionan solo un marco de referencia y tendencia de equilibrio termodinámico y madurez del agua, en este apartado se presenta el cálculo del modelado de procesos de mezcla basados en la relación isotópica de estroncio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) y el calcio como un elemento litófilo (Figuras 34 y 35), con muestras de los manantiales y pozos de la RMZ, y muestras de roca y de sitios de agua termal, así como pozos geotérmicos. Se utilizó como *end member* meteórico a la muestra de Agua Fría, clasificado previamente como "abierto" y de baja salinidad, con una relación isotópica

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de ≈ 0.7044 . Como *end members* de roca se utilizaron los datos de riolita de Verma *et al.* (2005) y andesita de Hernández-Bernal *et al.* (2016), quienes son los únicos autores que tienen datos isotópicos de las rocas de la región, con una relación isotópica baja $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \approx 0.7034$. Es importante notar que se ha utilizado una escala logarítmica para representar el inverso de las concentraciones de calcio, con la finalidad de que se proyecte una curva en lugar de una recta, y sea más fácil de identificar el porcentaje de mezcla.

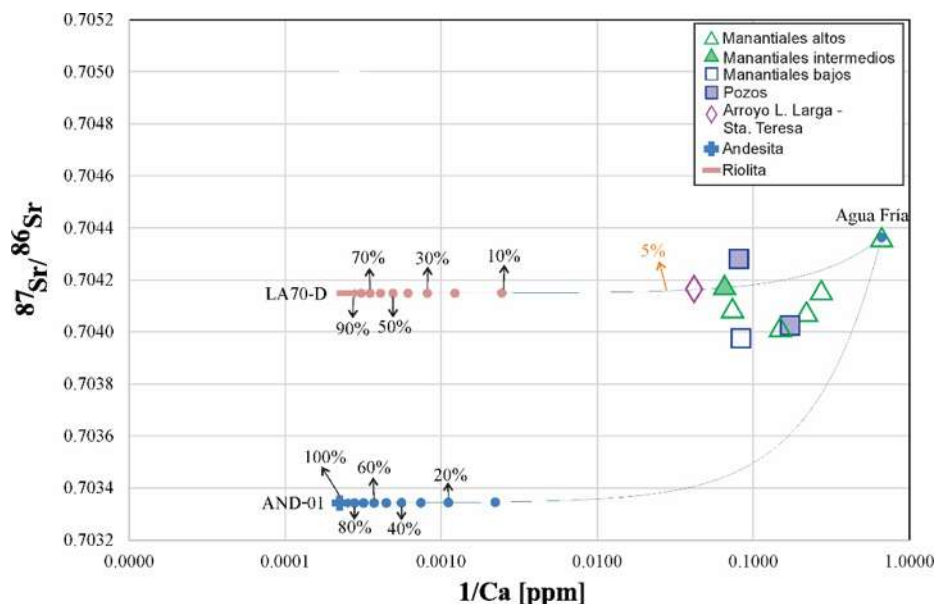


Figura 34. Diagrama de $1/\text{Ca}$ (ppm) vs relación isotópica de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ y su relación de mezcla con las rocas de la región: riolita y andesita. Fuente: Propia.

Como se puede observar en la Figura 34, resaltan los valores contrastantes de calcio entre las muestras de roca y los sitios de los manantiales; este valor es consistente con las firmas isotópicas primitivas o poco radiogénicas reportadas para las rocas del Cinturón Volcánico Transmexicano. Del mismo modo, es oportuno hacer notar las diferencias entre los valores isotópicos de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ para la andesita, la riolita y las muestras de agua. Estos datos son también consistentes, dado que la riolita, en cambio, presenta una relación isotópica más alta (≈ 0.7042) dada su composición félsica, en comparación con la andesita que tiene valores más bajos de Sr radiogénico por su menor contenido de Rb.

Como se observa en la Figura 34, la muestra de andesita no presenta alguna correlación con la muestra de Agua Fría, ni con las muestras de agua, excluyendo una relación isotópica de interacción agua-roca con el basamento andesítico profundo. Sin embargo, sí se observa una correlación lineal de mezcla con el *end member* de la riolita, de al menos cuatro muestras

(Jeráhuaro, Fco. I. Madero, Los Veneros y Arroyo L. Larga), mostrando una posible relación de mezcla pequeña <5% de fracción. Esto sugiere que el contacto del agua meteórica con la roca riolítica, no es lo suficientemente prolongado para modificar significativamente la relación isotópica del estroncio.

En la Figura 35 se presenta el diagrama de mezcla binaria $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs $1/\text{Ca}$ de las muestras de los manantiales de la RMZ en relación con muestras de aguas termales y de pozos geotérmicos, utilizando los datos de Abuharara (2017).

A diferencia del diagrama de correlación isotópica con las rocas (Figura 34), se observa que existe una fuerte correlación lineal entre las muestras de los manantiales de la RMZ y los sitios de agua termal (Marítaro, Adjuntas, Zimirao, Orquídeas) y el agua de pozo geotérmico (AZ-2A, AZ-89), lo cual sugiere que la hidrogeoquímica de las muestras de la RMZ pueden ser el resultado de mezcla entre la interacción de las aguas someras, el agua de tipo hidrotermal y de los fluidos geotérmicos.

Por otro lado, también resulta evidente que las muestras de los manantiales de la RMZ se distribuyen en dos grupos o clústeres: 1) Los Veneros, El Catorce, Tinajas, Taimeo; y 2) Arroyo L. Larga, Jeráhuaro, Fco. I. Madero y Cañada Los Lobos II.

Las muestras del grupo 1 se proyectan de manera casi colineal con la muestra del pozo geotérmico AZ-89, en el diagrama de la Figura 35 se pueden observar los puntos porcentuales, por lo cual los valores observados para el agua hidrotermal de Zimirao y Las Adjuntas, alcanzan una fracción de mezcla significativa de hasta el 70% con el agua de pozo geotérmico y de hasta el 90% con las aguas del balneario termal (Figura 35). Cabe destacar que estos dos sitios de aguas termales de Las Adjuntas y Las Orquídeas se encuentran muy cercanos entre sí, mientras que los Hervideros de Zimirao se encuentra en la localidad de Araró, con una fracción de mezcla de ~30%. También es oportuno mencionar que la correlación entre estas muestras se asocia también con los manantiales que mostraron mayores concentraciones de boro y arsénico, sugiriendo que la posible fuente de estos elementos pudiera provenir de la mezcla de agua geotérmica de los pozos.

Por su parte el grupo 2 de los manantiales de la RMZ se dispersa y aleja relativamente de las líneas de mezcla mencionadas anteriormente. Sin embargo, se alinean mejor con la muestra

del manantial termal de Marítaro 5, la cual es una manifestación termal con un porcentaje de hasta 35%.

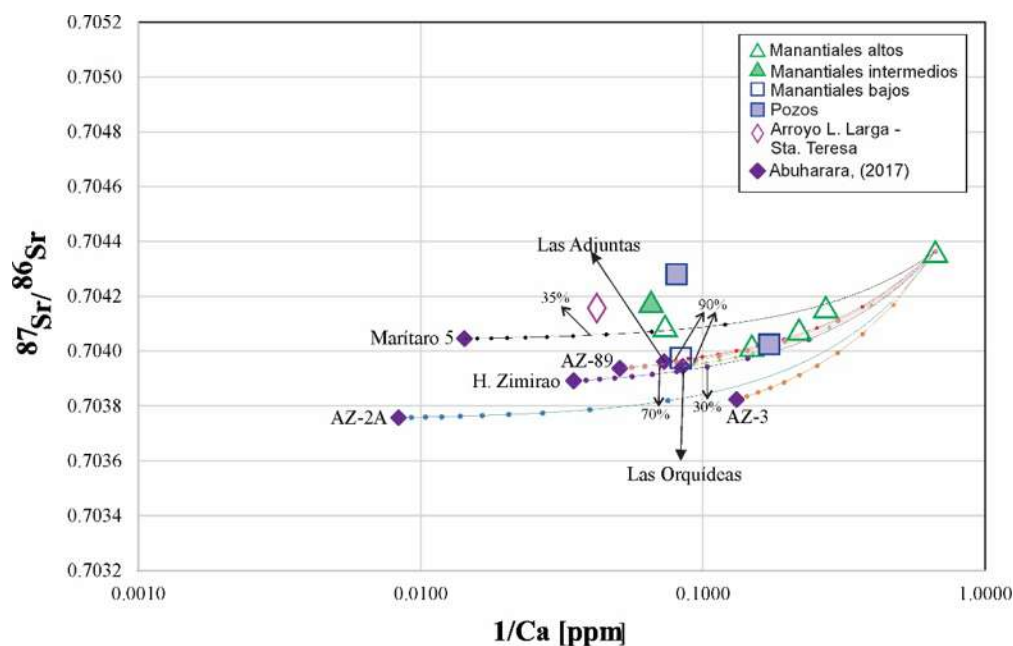


Figura 35. Diagrama de $1/Ca$ (ppm) vs relación isotópica de $^{87}Sr/^{86}Sr$ y su relación de mezcla con pozos geotérmicos, balnearios termales y manifestaciones termales. Fuente: Propia.

La correlación lineal de mezcla entre las aguas de manantiales de la RMZ y las aguas hidrotermales y de pozos geotérmicos, sugiere un proceso de interacción entre los diferentes sistemas hidrológico superficial y profundo. Este comportamiento isotópico valida la relación entre el control estructural de las fallas regionales y pozos productivos que actúan como conductos verticales que permiten el ascenso de los fluidos, así como las pérdidas de emisión de la operación del CGLA que actúa como proceso de contaminación en la RMZ. Así mismo, esta interacción de los sistemas acuíferos de la región, puede ser la causa principal del “enfriamiento” de los pozos productivos del CGLA (Abuharara, 2017).

Capítulo IX. Conclusiones

- 1) La marcada desigualdad hídrica de la RMZ entre la zona urbana, que cuenta con una relativa regulación, y las zonas rurales, que dependen de manantiales con muy poca infraestructura, da como consecuencia un elevado riesgo sanitario para su población.
- 2) Las facies hidrogeoquímicas de la RMZ están controladas por procesos heterogéneos de dilución de agua meteórica, que sugieren procesos de mezcla de fluidos hidrotermales y geotérmicos.
- 3) Al menos el 50% de las fuentes de agua en la RMZ presentan concentraciones de EPT (As, B, Si, Al, Fe) que se acercan o superan el límite máximo permisible establecido por normas nacionales e internacionales.
- 4) A pesar de las concentraciones fuera de norma de los EPT, los cálculos ponderados del ICA en la RMZ sugieren una calidad de agua que enmascara riesgos sanitarios reales y puede conducir a recomendaciones de gestión erróneas.
- 5) El análisis de correlación de Pearson valida que el Cl^- , B y As actúan como trazadores del proceso de mezcla entre agua meteórica y fluidos de origen hidrotermal y geotérmico en la RMZ.
- 6) El modelado isotópico de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ confirma que el proceso hidrogeoquímico de interacción agua-roca con unidades de andesitas y riolitas es relativamente mínimo (<5%).
- 7) El modelado isotópico de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ confirma que el proceso hidrogeoquímico de mezcla de agua es desde el 35% para los manantiales y hasta 90% para las aguas de flujo de río.

- 8) Se propone que la RMZ requiere de un monitoreo permanente en las fuentes de abastecimiento de agua para consumo humano, para garantizar la protección a la salud pública.

Referencias

- Abbasi, T., & Abbasi, S. A. (2012). *Water Quality Indices*. Elsevier Science.
- Abdel-Shafy, H. I., & Mansour, M. S. M. (2016). A review on polycyclic aromatic hydrocarbons: Source, environmental impact, effect on human health and remediation. *Egyptian Journal of Petroleum*, 25(1), 107–123. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2015.03.011>
- Abuharara A., (2017). Using Isotopes to Understand the Origin of Water and the Effect of Reinjection in the Los Azufers Geothermal Field in Mexico. Thesis of degree of Master. University of Waterloo.
- Aguilar-Sánchez G. & Aguilar-Sánchez D. (2023). Uso de la tierra en las comarcas del municipio de Zinapécuaro, Michoacán, México. *Revista Geográfica de América Central*, (70). <https://dx.doi.org/10.15359/rgac.70-1.9>
- Ali H., Khan E. & Ilahi I., (2019). Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: Environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation. *Journal of Chemistry*, 2019, 6730305. <https://doi.org/10.1155/2019/6730305>
- ALS. (2022). Ion Balance: Data Quality Validation for Metals & Anions in Waters (EnviroMail Canada, Número 36).
- American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), Water Environment Federation (WEF)., (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 23rd Edition. Washington, D.C.: American Public Health Association.
- Angell, C. A. (2008). Insights into phases of liquid water from study of its unusual glass-forming properties. *Science*, 319(5863), 582-587. DOI: 10.1126/science.1131939
- Ashbolt, N. J. (2004). Risk analysis of drinking water microbial contamination versus disinfection by-products. *Toxicology*, 198(1-3), 255-262. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2004.01.034>

- Appelo C.A.J., & Postma D., (2005). *Geochemistry, groundwater and pollution* (2nd ed.). A.A. Balkema Publishers ISBN 04 1536 421 3
- Arnórsson, S., Gunnlaugsson, E., & Svavarsson, H. (1983). The chemistry of geothermal waters in Iceland. II. Mineral equilibria and independent variables. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 47(3), 547–566. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(83\)90277-6](https://doi.org/10.1016/0016-7037(83)90277-6)
- Arnórsson, S. (2000). *Isotopic and Chemical Techniques in Geothermal Exploration, Development and Use*. International Atomic Energy Agency (IAEA).
- Atkins, P., & de Paula, J. (2010). *Physical Chemistry* (9th ed.). Oxford University Press. ISBN: 0-1992-8095-9
- Ball, P. (2008). Water as an active constituent in cell biology. *Chemical Reviews*, 108(1), 74-108. DOI: 10.1021/cr068037a
- Bayer, P., Rybach, L., Blum, P., & Brauchler, R. (2013). Review on life cycle environmental effects of geothermal power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 446–463. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.039>
- Bell, R. P. (1973). *The Proton in Chemistry* (2nd ed.). Cornell University Press.
- Bentley, R.A. (2006). Strontium isotopes from the earth to the archaeological skeleton: A review. *Journal of Archaeological Method and Theory*, 13(3). DOI: 10.1007/s10816-006-9009-x
- Berner, E. K., y Berner, R. A. (2012). *Global Environment: Water, Air, and Geochemical Cycles* (2.^a ed.). Princeton University Press.
- Birkle, P., Torres-Rodríguez, V., González-Partida, E., & Guevara-García, M. (1997). El papel del sustrato geológico en el escurrimiento superficial y en los acuíferos del campo geotérmico Los Azufres. *Ingeniería Hidráulica en México*, 12(2).
- Birkle P. & Merkel B., (2000). field of Los Azufres, Michoacan, Mexico. Water, air, and soil pollution.
- Birkle P., Merkel B., Portugal E. & Torres-Alvarado I. S., (2001). The origin of reservoir fluids in the geothermal field of Los Azufres, Mexico — isotopical and hydrological indications. *Applied Geochemistry*, 16(15), 1595–1610. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(01\)00031-2](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(01)00031-2)
- Bošnjaković M., Stojkov M. & Jurjević M., (2018). Environmental impact of geothermal power plants. *Tehnički Vjesnik*, 25(6).
- Butt, H. J., Graf, K., & Kappl, M. (2003). *Physics and Chemistry of Interfaces*. Wiley-VCH. DOI:10.1002/3527602313
- Capo, R. C., Stewart, B. W., & Chadwick, O. A. (1998). Strontium isotopes as tracers of ecosystem processes: theory and methods. *Geoderma*, 82(1-3). DOI: 10.1016/S0016-7061(97)00102-X

- Chaplin, M. (2006). Do we underestimate the importance of water in cell biology? *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 7(11), 861-866. <https://doi.org/10.1038/nrm2021>
- Chapman D., (Ed.). (1996). *Water Quality Assessments: A Guide to the Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring* (2nd ed.). UNESCO/OMS/UNEP
- Chapra, S. C. (2008). *Surface Water Quality Modeling*. Waveland Press. ISBN 1-57766-605-4
- Chidiac, S. E., El Azzi, M., Ghanem, A., & Naba, S. (2023). A comprehensive review of water quality indices (WQIs): history, models, attempts and perspectives. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 22(2), 349–395. <https://doi.org/10.1007/s11157-023-09650-7>
- Chowdhury R., Ramond A., O'Keeffe L. M., Shahzad S., Kunutsor S. K., Muka T., Gregson J., Willeit P., Warnakula S., Khan H., Chowdhury S., Gobin R., Franco O. H. & Di Angelantonio E., (2018). Environmental toxic metal contaminants and risk of cardiovascular disease: systematic review and metaanalysis. *BMJ*, 362, k3310. <https://doi.org/10.1136/bmj.k3310>
- Christophersen N. & Hooper R. P., (1992). Multivariate analysis of stream water chemical data: The use of principal components analysis for the end-member mixing problem. *Water Resources Research*, 28(1). <https://doi.org/10.1029/91WR02518>
- Clark I.D., & Fritz P., (1997). *Environmental isotopes in hydrogeology*. CRC Press. Lewis Publishers.
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal), (2014). *Estudio de Cuenca de Abasto: Región Centro-Oriente del Estado de Michoacán*. CONAFOR.
- CONAGUA. (2015). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Datos Básicos para Proyectos de Agua Potable y Alcantarillado*. Comisión Nacional del Agua, México.
- CONAGUA, (2020). *Indicadores de Calidad del Agua: Metodología y Escalas de Clasificación*. Ciudad de México, México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- CONAGUA, (2021). *Estadísticas del Agua en México, edición 2021*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- CONAGUA, (2021). *Manual del Monitorista: Red Nacional de Medición de Calidad del Agua (RENAMECA)*. Ciudad de México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).
- CONAGUA, (2024). *Agua en el acuífero Morelia-Queréndaro (1602), estado de Michoacán*. SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA. GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.
- Corona-Chávez P., Cuevas-Villanueva R. A., Gómez-Vasconcelos G., González-Arqueros M. L., Figueroa-Soto Á. G. & Ramos-Arroyo Y. R. (2022). Diagnóstico de la calidad del agua e impacto ambiental en la tenencia de San Pedro Jácuaró, Municipio de Ciudad Hidalgo. Universidad Michoacana de San

Nicolás de Hidalgo, Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra; Universidad de Guanajuato, Facultad de Ingeniería en Geomática e Hidráulica.

- Corona-Chávez P., (2025). Energía geotérmica y sus relaciones de impacto ambiental en México. Enfermedad renal crónica: Un enfoque interdisciplinario en salud física, ambiental y sicosocial en el oriente de Michoacán. Primera edición digital, 2025. Comité editorial CNEIP.
- Cortés-Pizarro E., (2023). Caracterización de acuíferos y de sus procesos hidrogeoquímicos asociados: Caso del acuífero de Tongoy, Chile. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*.
- CPLADEM Michoacán. Ficha Municipal de Información 2022. Zinapécuaro.
- Cravotta, C. A., & Trahan, M. K., (1999). Limestone drains to increase pH and remove dissolved metals from acidic mine drainage. *Applied Geochemistry*, 14(5), 581-606. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(98\)00066-3](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(98)00066-3)
- Custodio, E., Llamas, M.R., 1996, Hidrología subterránea: Barcelona, Ediciones Omega S.A., 2 tomos, 2ª ed.
- Davis, J. A., & Kent, D. B. (1990). Surface complexation modeling in aqueous geochemistry. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 23(1), 177-260.
- Debenedetti, P. G., & Stanley, H. E. (2003). Supercooled and glassy water. *Physics Today*, 56(6), 40-46. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1595053>
- Díaz de León C., Robinson-Fuentes V. A., Obregón-Velasco N., (2025). Autocuidado y calidad de vida de pacientes con enfermedad renal crónica en la región oriente de Michoacán. *Enfermedad renal crónica: Un enfoque interdisciplinario en salud física, ambiental y psicosocial en el oriente de Michoacán*
- Drever J.I., (1997). *The geochemistry of natural waters: Surface and groundwater environments* (3rd ed.). Prentice Hall.
- Duffus, J. H. (2002). "Heavy metals"—A meaningless term? (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 74(5), 793–807. <https://doi.org/10.1351/pac200274050793>
- Dzombak, D. A., & Morel, F. M. (1990). *Surface complexation modeling: Hydrous ferric oxide*. John Wiley & Sons. ISBN: 0-471-63731-9
- Eagles-Smith C. A., Silbergeld E. K., Basu N., Bustamante P., Diaz-Barriga F., Hopkins W. A., Kidd K. A. & Nyland J. F., (2018). Modulators of mercury risk to wildlife and humans in the context of rapid global change. *Ambio*, 47(2). <https://doi.org/10.1007/s13280-017-1011-x>
- Eigen, M., & De Maeyer, L. (1958). Self-dissociation and protonic charge transport in water and ice. *Proceedings of the Royal Society of London A*, 247(1251), 505-533. <https://doi.org/10.1098/rspa.1958.0208>

- Eisenberg D. & Kauzmann W. (2005). The structure and properties of water. Oxford University Press.
- EPA, (2015). Human Health Ambient Water Quality Criteria: 2015 Update. EPA-HQ-OW-2014-0135
- Escalona-Domenech R. Y., Villareal-Fuentes J. M., Infante-Mata D. M. & Barrios-Calderón R. de J., (2024). Calidad del agua para uso agrícola y consumo humano en el río Huixtla, Chiapas, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. DOI: 10.20937/RICA.55101
- Faure G. & Mensing T. M., (2005). *Isotopes Principles and Applications*. Third Edition. John Wiley & Sons.
- Fewtrell, L. (2004). Drinking-water nitrate, methemoglobinemia, and gastric cancer: A review. *Environmental Health Perspectives*, 112(14), 1371–1374. <https://doi.org/10.1289/ehp.7216>
- Franks F., (2000). *Water: A matrix of life*. Royal Society of Chemistry. RSC Paperbacks, Cambridge, UK.
- García, E. - Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), (1998). 'Climas' (clasificación de Köppen, modificado por García). Escala 1:1000000. México.
- Garrels R.M. & Christ C.L., (1965). *Solutions, minerals, and equilibria*. Harper & Row.
- Genchi G., Sinicropi M. S., Lauria G., Carocci A. & Catalano A., (2020). The effects of cadmium toxicity. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(11), 3782. <https://doi.org/10.3390/ijerph17113782>
- Georgios M. Kontogeorgis, Andrew Holster, Nomiki Kottaki, Evangelos Tsochantaris, Frederik Topsøe, Jesper Poulsen, Michael Bache, Xiaodong Liang, Nikolaj Sorgenfrei Blom, Johan Kronholm, (2022). Water structure, properties and some applications – A review, *Chemical Thermodynamics and Thermal Analysis*, Volume 6. <https://doi.org/10.1016/j.ctta.2022.100053>.
- Gibbs, R.J., (1970). *Mechanisms Controlling World Water Chemistry*. Science, Vol. 170.
- Giggenbach, W. F., (1988). Geothermal Solute Equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca Geoindicators. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52, 2749-2765.
- Giggenbach, W. F. (1992). Isotopic shifts in waters from geothermal and volcanic systems along convergent plate boundaries and their origin. *Earth and Planetary Science Letters*, 113(4). [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(92\)90127-H](https://doi.org/10.1016/0012-821X(92)90127-H)
- Gilliom, R. J., Barbash, J. E., Crawford, C. G., Hamilton, P. A., Martin, J. D., Nakagaki, N., Nowell, L. H., Scott, J. C., Stackelberg, P. E., Thelin, G. P., & Wolock, D. M. (2006). *The Quality of Our Nation's Waters: Pesticides in the Nation's Streams and Ground Water, 1992–2001*. (U.S. Geological Survey Circular 1291). U.S. Department of the Interior.
- Goldich S. S. (1938) A Study in Rock-Weathering. *The Journal of Geology*, 46 (1) 17-58 doi:10.1086/624619

- Gómez Cruz, K. (2020). Estudio de la hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea en la cuenca del Lago de Cuitzeo [Tesis de maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo].
- González-Partida, E. (1999). Comportamiento de fluidos en un sistema hidrotermal actual: Caso de Los Azufres, Michoacán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 16(2), 208-216. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología y Sociedad Geológica Mexicana.
- González-Partida E., Tello-Hinojosa E., Pal-Verma M., (2000). Análisis geoquímico e isotópico de agua geotermales y manantiales para definir el estado de equilibrio agua-roca del reservorio de Los Azufres, Michoacán, México. *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. XV, No. 3.
- Grandjean, P., & Landrigan, P. J. (2014). Neurobehavioural effects of developmental toxicity. *The Lancet Neurology*, 13(3), 330-338. [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(13\)70278-3](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(13)70278-3)
- Gray, J. R. (2004). Conductivity analyzers and their application. In *Environmental Instrumentation and Analysis Handbook* (pp. 491-510). Wiley. <https://doi.org/10.1002/0471473332.ch23>
- Gruss L, Wiatkowski M, Pulikowski K, Kłos A (2021) Determination of changes in the quality of surface water in the river reservoir system. *Sustainability* 13:3457. <https://doi.org/10.3390/su13063457>
- Güler C., Thyne G. D., McCray J. E. & Turner A. K., (2002). Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data. *Hydrogeology Journal*, 10(4). DOI: 10.1007/s10040-002-0196-6
- Hasenaka, T., and Carmichael, I.S.E., 1985, A compilation of location, size, and geomorphological parameters of volcanoes of the Michoacan-Guanajuato volcanic field, central Mexico: *Geofísica Internacional*, v. 24.
- Hasted, J. B., Ritson, D. M., & Collie, C. H. (1948). Dielectric properties of aqueous ionic solutions. *The Journal of Chemical Physics*, 16(1), 1-21. <https://doi.org/10.1063/1.1746645>
- Hem J. D., (1985). *Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water* (3rd ed.). U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2254. <https://doi.org/10.3133/wsp2254>
- Hernández, A. (1930). Estudio hidrogeológico de Ucareo, Estado de Michoacán. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Tomo X(5-6), 148-173. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM1938v10n5a1>
- Hernández-Bernal, M. del S., Corona-Chávez, P., Solís-Pichardo, G., Schaaf, P., Solé-Viñas, J., & Molina, J. F. (2016). Miocene andesitic lavas of Sierra de Angangueo: a petrological, geochemical, and geochronological approach to arc magmatism in Central Mexico. *International Geology Review*, 58(5), 603–625. <https://doi.org/10.1080/00206814.2015.1101356>

- Hernández-Santoyo A., (2025). Caracterización socioeconómica y de infraestructura de salud de la región oriente de Michoacán y su relación con la vulnerabilidad ante la ERCEND. Enfermedad renal crónica: Un enfoque interdisciplinario en salud física, ambiental y sicosocial en el oriente de Michoacán
- IARC (International Agency for Research on Cancer). (2012). Arsenic, metals, fibres, and dusts. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Volume 100C. Lyon, France: IARC. ISBN 978-92-832-1320-8
- Iavicoli I., Fontana L. & Bergamaschi A., (2009). The effects of metals as endocrine disruptors. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B*, 12(3), 206-223. <https://doi.org/10.1080/10937400902902062>
- INEGI, (2020). Carta de Uso de Suelo y Vegetación.
- Israde-Alcántara, I., Garduño-Monroy, V. H., & Ortega-Murillo, R. (2002). Paleoambiente lacustre del Cuaternario tardío en el centro del lago de Cuitzeo. *Hidrobiológica*, 12(1), 61-78.
- Israelachvili, J. N. (2011). *Intermolecular and Surface Forces* (3rd ed.). Academic Press. ISBN: 978-0-12-391927-4
- Jiménez-Cisneros B., (2007). Información y calidad del agua en México. *Trayectorias*, 9(24), 45-56.
- Jones, K. C., & de Voogt, P. (1999). Persistent organic pollutants (POPs): state of the science. *Environmental Pollution*, 100(1-3), 209–221. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(99\)00098-6](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00098-6)
- Jørgensen, N. O., Andersen, M. S., & Engesgaard, P. (2008). Investigation of a dynamic seawater intrusion event using strontium isotopes ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$). *Journal of Hydrology*, 348(3-4). <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.10.001>
- Jurado-Calderón D., (2025). Análisis morfoestructural de la Región Oriente de Michoacán, México y su relación con los procesos hidrológicos e impacto ambiental. Tesis de Licenciatura. UNAM.
- Kumar, P. (2015), Hydrocomplexity: Addressing water security and emergent environmental risks, *Water Resour. Res.*, 51. doi:10.1002/2015WR017342.
- Landrigan P. J., Fuller R., Acosta N. J., Adeyi O., Arnold R., Basu N., Baldé A. B., Bertollini R., Bose-O'Reilly S., Boufford J. I., Breyse P. N., Chiles T., Mahidol C., Coll-Seck A. M., Cropper M. L., Fobil J., Fuster V., Greenstone M., Haines A. & Zhong M., (2018). The Lancet Commission on pollution and health. *The Lancet*, 391(10119). [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(17\)32345-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)32345-0)
- LANGEM (Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía), 2025. UNAM
- Langmuir, D. (1997). *Aqueous Environmental Geochemistry*. Prentice Hall, Upper Saddle River.

- Leclerc, H., Schwartzbrod, L., & Dei-Cas, E. (2002). Microbial agents associated with waterborne diseases. *Critical Reviews in Microbiology*, 28(4), 371–409.
- Liu J., Qu W., & Kadiiska M. B., (2009). Role of oxidative stress in cadmium toxicity and carcinogenesis. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 238(3), 209-214. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2009.01.029>
- Madigan, M. T., Bender, K. S., Buckley, D. H., Sattley, W. M., & Stahl, D. A. (2019). *Brock biology of microorganisms* (15th ed.). Pearson.
- Marcus, Y. (2009). Effect of ions on the structure of water: Structure making and breaking. *Chemical Reviews*, 109(3), 1346-1370. DOI: 10.1021/cr8003828
- Mazari-Hiriart, M. (2008). Calidad del agua: conceptos básicos. En B. Jiménez, M. L. Torregrosa, & L. Aboites (Eds.), *El agua en México: cauces y encauces* (pp. 101–118). Academia Mexicana de Ciencias - Comisión Nacional del Agua.
- Mendoza-Rangel E. & Hernández-Ayala C., (2004). Environmental protection at the Los Azufres, Mich., geothermal field. *Geothermia*.
- Meybeck, M. (1987) Global Chemical Weathering of Surficial Rocks Estimated from River Dissolved. *American Journal of Science*, 287, 401-428. <https://doi.org/10.2475/ajs.287.5.401>
- Muyzer, G., & Stams, A. J. (2008). The ecology and biotechnology of sulphate-reducing bacteria. *Nature Reviews Microbiology*, 6(6), 441-454. <https://doi.org/10.1038/nrmicro1892>
- Ng, J. C., Wang, J., & Shraim, A. (2003). A global health problem caused by arsenic from natural sources. *Chemosphere*, 52(9), 1353-1359. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(03\)00470-3](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(03)00470-3)
- NHMRC (National Health and Medical Research Council), (2011). *Australian Drinking Water Guidelines 6* (2011) - Versión 4.0 Updated [June 2025]. Commonwealth of Australia.
- Nordberg G. F., Fowler B. A. & Nordberg M. (Eds.), (2018). *Handbook on the toxicology of metals* (4th ed.). Academic Press.
- Nordstrom, D. K., & Alpers, C. N. (1999). Geochemistry of acid mine waters. In G. S. Plumlee & M. J. Logsdon (Eds.), *The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits. Part A: Processes, Techniques, and Health Issues* (Reviews in Mineralogy, Vol. 38, pp. 133–160). Mineralogical Society of America. DOI:10.5382/Rev.06.06
- Nordstrom, D. K., y Munoz, J. L. (1994). *Geochemical Thermodynamics* (2.^a ed.). Boston, MA: Blackwell Scientific Publications. ISBN: -932846-09-3

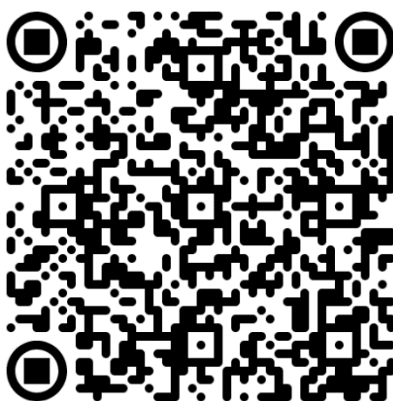
- Núñez-Hernández S., (2019). Comportamiento isotópico de $\delta^{18}\text{O}$ y δD de fluidos del campo geotérmico de Los Azufres Michoacán. Tesis Doctoral. Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo.
- Ohtaki, H., & Radnai, T. (1993). Structure and dynamics of hydrated ions. *Chemical Reviews*, 93(3), 1157-1204. DOI: 10.1021/cr00019a014
- OMS, (2011). Guías para la calidad del agua de consumo humano. Cuarta Edición. Who.int. Ginebra ISBN 978-92-4-4 354995-8
- Ott, W. R. (1978). *Environmental Indices: Theory and Practice*. Ann Arbor Science Publishers.
- Panduro-Rivera M. G., (2015). Evaluación de la calidad del agua ante la enfermedad crónica renal en la zona oriente de Michoacán. Tesis de Maestría. Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A. C.
- Panduro-Rivera M. G., Hernández-Mena L., López-López A. Murillo-Tovar M. A., Díaz-Torres J. J. & del Real-Olvera J., (2014). Evaluation of water quality related with chronic kidney disease in the East Zone of Michoacan, Mexico. *Revista Tlamati*, 5(3).
- Peng H (2022) Hydrochemical characteristics and health risk assessment of groundwater in karst areas of southwest China: a case study of Bama, Guangxi. *J Clean Prod* 341:130872. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130872>
- Pérez-Esquivias H., Macías-Vázquez J. L., Garduño-Monroy V. H., Arce-Saldaña J. L., García-Tenorio F., Castro-Govea R., Laver P., Saucedo-Girón R., Martínez C., Jiménez-Haro A., Valdés G., Meriggi L. & Hernández R., (2010). Estudio vulcanológico y estructural de la secuencia estratigráfica Mil Cumbres y del campo geotérmico de Los Azufres, Mich. Comisión Federal de Electricidad (CFE). *Geotermia*, Vol. 23.
- Pérez-Martínez I., Villanueva-Estrada, R. E., García-Martínez, R., Rodríguez-Díaz, A., & Canet, C. (2021). Anomalías y mecanismos de transporte de mercurio en un sistema hidrotermal asociado a fallas normales en Araró, Michoacán (occidente de México). *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 38(2), 86-99.
- Pinti D.L., Castro M.C., Shouakar-Stash O., Tremblay A., Garduño V.H., Hall C.M., Hélie J.-F., Ghaleb B., (2013). Evolution of the geothermal fluids at Los Azufres, Mexico, as traced by noble gas isotopes, $\delta^{18}\text{O}$, δD , $\delta^{13}\text{C}$ and $87\text{Sr}/86\text{Sr}$. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. Volume 249.
- Piper A. M., (1944). A Graphic Procedure in the Geochemical Interpretation of Water-Analyses. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, Vol. 25.

- Plummer, L. N., Busby, J. F., Lee, R. W., & Hanshaw, B. B. (1990). Geochemical modeling of the Madison aquifer in parts of Montana, Wyoming, and South Dakota. *Water Resources Research*, 26(9), 1981–2014.
- Podgorski, J., & Berg, M., (2020). Global threat of arsenic in groundwater. *Science*, 368(6493), 845-850. <https://doi.org/10.1126/science.aba1510>
- Prieto-Barajas, C. M., Alfaro-Cuevas, R., Valencia-Cantero, E., & Santoyo, G. (2017). Effect of seasonality and physicochemical parameters on bacterial communities in two hot spring microbial mats from Araró, Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88(3). <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.07.010>
- Rainbow, P. S. (2002). Trace metal concentrations in aquatic invertebrates: why and so what? *Environmental Pollution*, 120(3), 497–507. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(02\)00238-0](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(02)00238-0)
- Robinson-Fuentes V. A., Corona-Chávez P. & Rivera Heredia M. E., (2023). Enfermedad Renal Crónica en la Región Oriente de Michoacán y su relación con las condiciones naturales, impacto ambiental y psicosocial. Instituto de Ciencia, Tecnología e Innovación, CONACYT.
- Salomons, W., & Förstner, U. (1984). *Metals in the Hydrocycle*. Springer-Verlag. DOI:10.1007/978-3-642-69325-0_3
- Saitúa, H., Gil, R., & Padilla, A. P. (2005). Experimental observation on the removal of arsenic and boron from water by reverse osmosis. *Desalination*, 172(2), 173-180. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.06.200>
- Sargaonkar, A., & Deshpande, V. (2003). Development of an overall index of pollution for surface water based on a general classification scheme in Indian context. *Environmental monitoring and assessment*, 89(1), 43–67. <https://doi.org/10.1023/a:1025886025137>
- Schijven J.F., Teunis P.F., Rutjes S.A., Bouwknecht M., de Roda Husman AM., (2011). QMRAspot: a tool for Quantitative Microbial Risk Assessment from surface water to potable water. *Water Res.* 45(17) doi: 10.1016/j.watres.2011.08.024.
- Schwarzenbach, R. P., Gschwend, P. M., & Imboden, D. M. (2003). *Environmental organic chemistry* (2nd ed.). John Wiley & Sons. ISBN: 978-0-471-64964-9
- Segovia, N., Barragán, R. M., Tello, E., Alfaro, R., Mena, M., Pulinets, S., & Leyva, A. (2005). Geochemical exploration at Cuitzeo Basin geothermal zone (Mexico). *Journal of Applied Sciences*, 5(9), 1658–1664. <https://doi.org/10.3923/jas.2005.1658.1664>
- Smith, V. H., Tilman, G. D., & Nekola, J. C. (1999). Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. *Environmental Pollution*, 100(1-3), 179–196. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(99\)00091-3](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00091-3)

- SSA (Secretaría de Salud), (2021). Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua. Diario Oficial de la Federación 02/05/2022.
- Sposito, G. (2008). The chemistry of soils (2nd ed.). Oxford University Press.
- Stiff H. A., (1951). Interpretation of Chemical Water Analysis by Means of Pattern. Journal of Petroleum Technology. Vol 192.
- Stillinger, F. H. (1980). Water revisited. Science, 209(4455), 451-457. DOI: 10.1126/science.209.4455.451
- Stumm, W. (1992). Chemistry of the solid-water interface: Processes at the mineral-water and particle-water interface in natural systems. John Wiley & Sons. ISBN: 978-0-471-57672-3
- Stumm, W., Morgan, J.J. (1996). Aquatic chemistry: chemical equilibria and rates in natural waters. John Wiley & Sons.
- Swaminathan, S., & Singh, M. (2022). Trace elements, toxic metals, and metalloids in kidney disease. En Nutritional Management of Renal Disease (4.^a ed., Cap. 27, pp. 467-481). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818540-7.00019-7>
- Tchobanoglous, G., Burton, F. L., & Stensel, H. D. (Metcalf & Eddy, Inc.) (2003). Wastewater Engineering: Treatment and Reuse (4th ed.). McGraw-Hill.
- Tchounwou P. B., Yedjou C. G., Patlolla A. K. & Sutton D. J., (2012). Heavy metal toxicity and the environment. In A. Luch (Ed.), Molecular, Clinical and Environmental Toxicology. Experientia Supplementum, vol 101 (pp. 133-164). Springer, Basel. https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4_6
- Tóth J., (2000). Las aguas subterráneas como agente geológico: causas, procesos y manifestaciones: Boletín Geológico y Minero, Vol. 111.
- Tyagi, S., Sharma, B., Singh, P., & Dobhal, R. (2013). Water quality assessment in terms of water quality index. American Journal of Water Resources, 1(3), 34–38. <https://doi.org/10.12691/ajwr-1-3-3>
- UNESCO. (2021). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2021: El valor del agua. París, Francia: UNESCO.
- Vargaftik, N. B., Volkov, B. N., & Voljak, L. D. (1983). International tables of the surface tension of water. Journal of Physical and Chemical Reference Data, 12(3), 817-820. <https://doi.org/10.1063/1.555688>
- Varol, S., Davraz, A., Şener, Ş., Şener, E., Aksever, F., Kırkan, B., & Tokgözlü, A. (2021). Assessment of groundwater quality and usability of Salda Lake Basin (Burdur/Turkey) and health risk related to arsenic pollution. Journal of Environmental Health Science and Engineering. <https://doi.org/10.1007/s40201-021-00638-5>

- Verma, S. P., & Santoyo, E. (1997). New improved equations for Na/K, Na/Li and SiO₂ geothermometers by outlier detection and rejection. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 79(1-2), 9-23. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(97\)00024-3](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(97)00024-3)
- Verones, F., Hanafiah, M. M., Pfister, S., Huijbregts, M. A. J., Koehler, A., & Hellweg, S. (2010). Characterization factors for thermal pollution in freshwater for life cycle impact assessment. *Environmental Science & Technology*, 44(24), 9364–9371
- Viggiano Guerra, J. C., & Gutiérrez Negrín, L. C. A. (2003). Régimen de flujo hidrotermal en la zona geotérmica de Araró, Michoacán, México. *Ingeniería Hidráulica en México*, 18(1).
- Vigil Barrientos, A. J. (2017). Caracterización geológica y geoquímica de fluidos en el sistema geotérmico Araró, Michoacán, México [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León]. Facultad de Ciencias de la Tierra.
- Ward, B. B. (2008). Nitrification in marine systems. In D. G. Capone, D. A. Bronk, M. R. Mulholland, & E. J. Carpenter (Eds.), *Nitrogen in the marine environment* (2nd ed., pp. 199-261). Academic Press. DOI:10.1016/B978-0-12-372522-6.00005-0
- Wernet, P., Nordlund, D., Bergmann, U., Cavalleri, M., Odelius, M., Ogasawara, H., ... & Pettersson, L. G. M. (2004). The structure of the first coordination shell in liquid water. *Science*, 304(5673), 995-999. DOI: 10.1126/science.1096205
- Valko M., Jomova K., Rhodes C. J., Kuča K. & Musílek K., (2015). Redox- and non-redox-metal-induced formation of free radicals and their role in human disease. *Archives of Toxicology*, 90(1), 1-37. <https://doi.org/10.1007/s00204-015-1579-5>
- Zakir HM, Sharmin S, Akter A, Rahman MS (2020) Assessment of health risk of heavy metals and water quality indices for irrigation and drinking suitability of waters: a case study of Jamalpur Sadar area, Bangladesh. *Environ.* <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2020.100005>
- Zumft, W. G. (1997). Cell biology and molecular basis of denitrification. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 61(4), 533-616. DOI: 10.1128/mmbr.61.4.533-616.1997

Anexos



Escanéame o clic en el QR

Luis Enrique Juárez Martínez

CALIDAD DEL AGUA Y PROCESOS HIDROGEOQUÍMICOS EN LA REGIÓN DEL MUNICIPIO DE ZINAPÉCUARO, MICHOACÁN...



Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:old::3117:570287843

Fecha de entrega

23 mar 2026, 8:47 a.m. GMT-6

Fecha de descarga

23 mar 2026, 8:51 a.m. GMT-6

Nombre del archivo

CALIDAD DEL AGUA Y PROCESOS HIDROGEOQUÍMICOS EN LA REGIÓN DEL MUNICIPIO DE ZINAPÉ....pdf

Tamaño del archivo

10.9 MB

146 páginas

42.933 palabras

235.063 caracteres

12% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 12%  Fuentes de Internet
- 9%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión



Texto oculto

571 caracteres sospechosos en N.º de páginas

El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión

Programa educativo	Maestría en Geociencias y Planificación del Territorio	
Título del trabajo	Calidad del agua y procesos hidrogeoquímicos en la región del municipio de Zinapécuaro, Michoacán, México	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Luis Enrique Juárez Martínez	1209637d@umich.mx
Director	Jorge Alejandro Ávila Olivera	alejandro.avila@umich.mx
Codirector	Pedro Corona Chávez	pedro.corona@umich.mx
Coordinador del programa	Boris Chako Tchamabe	mae.geociencias.planificacion.territorio@umich.mx

Uso de Inteligencia Artificial

Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	No	

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	No	
Traducción a otra lengua	No	
Revisión y corrección de estilo	No	
Análisis de datos	No	
Búsqueda y organización de información	No	
Formateo de las referencias bibliográficas	Si	Búsqueda de artículos para temas en específico
Generación de contenido multimedia	No	
Otro	No	

Datos del solicitante	
Nombre y firma	
Lugar y fecha	Morélia, Mich. 17 marzo 2026